



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

PARAMETRY LASEROVÉHO PAPRSKU

PARAMETERS OF THE LASER BEAM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Zbyněk Hort

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Karel Osička, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Zbyněk Hort**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Karel Osička, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Parametry laserového paprsku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rozbor parametrů technologie řezání laserovým paprskem pro jednotlivé druhy používaných materiálů.

Cíle diplomové práce:

Princip technologie řezání laserovým paprskem.

Technologické možnosti laserového paprsku.

Rozbor používaných materiálů, výběr představitelů.

Experimentální odzkoušení parametrů laserového řezání pro jednotlivé materiálové představitele.

Vyhodnocení nastavených parametrů z hlediska produktivity práce a kvality řezu.

Diskuze výsledků.

Seznam literatury:

MAŇKOVÁ, Ildikó. Progresívne technológie. 1. vydanie. Košice: Viena, 2000, 275 s. ISBN 80-7099-430-4.

BARCAL, Jaroslav. Nekonenční metody obrábění. Skriptum FSI ČVUT. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1989.

HÍREŠ, Ondrej, Michal HATALA a Sergej HLOCH. Delenie kovových materiálov okružnou pílou, vodným prúdom a plazmovým oblúkom, 1. vydání. Jiří Pustina: Ostrava – Poruba, 2007, 147 s. ISBN 978-80-8073-769-6.

CARISTAN, Charles L. Laser cutting guide for manufacturing. 1th ed. Michigan: SME, 2004. p. 447. ISBN 978-0-87263-686-6.


BENKO Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Robert BIELAK. I. Laserové technologie, 1. vydání. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859. ISBN 80-227-1425-9.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 4. 11. 2016



prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se skládá celkem ze tří hlavních částí. První část práce se věnuje teoretickému popisu laseru a ostatních nekonvenčních technologií. V druhé části je práce zaměřena na odzkoušení nastavení parametrů laseru a vyhodnocení nejvhodnějších parametrů. V poslední části diplomová práce pojednává o porovnání nekonvenčních technologií z hlediska kvality řezu.

Klíčová slova

Laser, řezání, nekonvenční technologie, vodní paprsek, plazma, vysekávací lis, parametry, kvalita řezu

ABSTRACT

The diploma thesis consists of the three main parts. The first part deals with the theoretical description of the laser technology and other unconventional technologies. In the second part, the thesis is focused on testing the parameters of the laser and evaluating the most suitable parameters. In the last part the diploma thesis deals with comparison of unconventional technologies in terms of cut quality

Key words

Laser, cutting, unconventional technology, water jet, plasma, punching machine, parameters, quality of cutting surface

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HORT, Zbyněk. *Parametry laserového paprsku*. Brno 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 60 s. 5 příloh. Ing. Karel Osička, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Parametry laserového paprsku**) vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Zbyněk Hort

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu mé práce Ing. Karlu Osičkovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při vypracování diplomové práce.

Dále chci poděkovat firmám HKD Třebíč, Mico Třebíč, Jurka Třebíč, Mann- Hummel za podporu při řešení tohoto projektu, za poskytnutí neomezeného přístupu ke strojům a za poskytnutí přístupu do měřících laboratoří.

V poslední řadě, bych chtěl poděkovat své přítelkyni a rodině, za podporu během celého studia.

Děkuji.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ.....	6
ÚVOD	11
1 PRINCIP TECHNOLOGIE ŘEZÁNÍ LASEROVÝM PAPRSKEM.....	12
1.1 Základní princip činnosti laseru.....	13
1.2 Vlastnosti laserového paprsku	15
1.3 Druhy laserů	16
1.3.1 Plynové lasery CO ₂ Laser	17
1.3.2 Nd:YAG Laser	18
1.3.3 Vláknový laser	18
1.3.4 Polovodičový laser	19
1.4 Princip a metody řezání laserem	19
1.4.1 Tavné řezání	20
1.4.2 Oxidační řezání	21
1.4.3 Sublimační řezání	21
1.5 Technologické parametry laserového řezání	21
1.5.1 Výkon	22
1.5.2 Řezná rychlost	22
1.5.3 Poloha ohniska.....	22
1.5.4 Ohnisková vzdálenost	23
1.5.5 Vlnová délka.....	23
1.5.6 Typ plynu.....	23
1.5.7 Tlak plynu.....	23
1.6 Ostatní použité technologie	24
1.6.1 Řezání vodním paprskem	24
1.6.2 Technologie vysekávacího lisu.....	26
1.6.3 Řezání plazmou	28
2 TECHNOLOGICKÉ MOŽNOSTI LASEROVÉHO PAPRSKU	30
2.1 Svařování laserem.....	30
2.2 Vrtání laserem	30
2.3 Řezání laserem.....	30
2.4 Dekorace skla laserem	30
2.5 Značení, značkování a popis laserem.....	31
2.6 Gravírování (mikrofrézování) laserem.....	31
2.7 Tepelné zpracování laserem.....	31
2.8 Nanášení ochranných a otěruvzdorných povlaků laserem.....	31
2.9 Soustružení laserem	32

2.10 Frézování laserem	32
2.11 Využití laserů v ostatních odvětvích	32
3 ROZBOR POUŽÍVANÝCH MATERIÁLŮ, VÝBĚR PŘEDSTAVITELŮ	33
3.1 Rozbor používaných materiálů	33
3.1.1 Kovové materiály	34
3.1.2 Nekovové materiály	36
3.2 Výběr představitelů	37
3.2.1 DC01	37
3.2.2 S235JR	37
3.2.3 C45	38
3.2.4 EN X5CrNi18-10	38
3.2.5 Hliníková slitina AlMg3	39
4 EXPERIMENTÁLNÍ ODZKOUŠENÍ PARAMETRŮ LASEROVÉHO ŘEZÁNÍ PRO JEDNOTLIVÉ MATERIÁLOVÉ PŘEDSTAVITELE	40
4.1 Cíl experimentu	40
4.1.1 Představení společnosti HKD Třebíč	40
4.2 Výroba vzorků	40
4.2.1 DC01	42
4.2.2 S235JR	44
4.2.3 C45	46
4.2.4 EN X5CrNi18-10	48
4.2.5 Hliníková slitina AlMg3	50
5 TESTOVÁNÍ VZORKŮ	51
5.1 Rozměrová přesnost	51
5.2 Tvrdost	52
5.3 Drsnost	54
5.4 Velikost otřepů a optická kontrola řezné hrany	55
6 VYHODNOCENÍ NASTAVENÝCH PARAMETRŮ Z HLEDISKA PRODUKTIVITY PRÁCE A KVALITY ŘEZU	56
6.1 Rozměrová přesnost	56
6.1.1 DC01	56
6.1.2 S235JR	59
6.1.3 C45	62
6.1.4 EN X5CrNi18-10	65
6.1.5 Hliníková slitina AlMg3	68
6.2 Tvrdost	71
6.2.1 DC01	72
6.2.2 S235JR	73
6.2.3 C45	75

6.2.4 EN X5CrNi18-10	77
6.2.5 Hliníková slitina AlMg3	79
6.3 Drsnost	81
6.3.1 DC01	81
6.3.2 S235JR	83
6.3.3 C45.....	85
6.3.4 EN X5CrNi18-10	87
6.3.5 Hliníková slitina AlMg3	89
6.4 Velikost otřepů a optická kontrola	91
6.4.1 DC01	91
6.4.2 S235JR	92
6.4.3 C45.....	92
6.4.4 EN X5CrNi18-10	93
6.4.5 Hliníková slitina AlMg3	93
7 DISKUSE A VZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ Z PRVNÍ ČÁSTI EXPERIMENTU	95
7.1 DC01.....	95
7.1.1 DC01_3 mm	95
7.1.2 DC01_6 mm	96
7.2 S235JR	96
7.2.1 S235JR_3 mm	96
7.2.2 S235JR_6 mm	97
7.3 C45	98
7.3.1 C45_3 mm.....	98
7.3.2 C45_6 mm.....	98
7.4 EN X5CrNi18-10	99
7.4.1 EN X5CrNi18-10_3 mm.....	99
7.4.2 EN X5CrNi18-10_6 mm.....	100
7.5 Hliníková slitina AlMg3.....	100
7.5.1 AlMg3_3 mm	100
7.5.2 AlMg3_6 mm	101
8 EXPERIMENTÁRNÍ POROVNÁNÍ NEKONVENČNÍCH METOD OBRÁBĚNÍ	102
8.1 Výroba vzorků	102
8.1.1 Vláknový laser	103
8.1.2 Vodní paprsek	104
8.1.3 Vysekávací lis	105
8.1.4 Plasma	107
8.2 Testování vzorků.....	108
8.2.1 Rozměrová přesnost	108
8.2.2 Tvrdost	109

8.2.3 Drsnost.....	109
8.2.4 Velikost otřepů a optická kontrola řezné hrany.....	109
8.2.5 Mikrostruktura	109
8.2.6 Moment a uínací síla potřebné pro řezání závitů	110
8.2.7 Test povrchové úpravy	112
8.3 Vyhodnocení výsledků	114
8.3.1 Rozměrová přesnost	114
8.3.2 Tvrdost	117
8.3.3 Drsnost.....	119
8.3.4 Velikost otřepů a optická kontrola řezné hrany.....	121
8.3.5 Mikrostruktura	122
8.3.6 Moment a síla potřebná pro řezání závitů	125
8.3.7 Test povrchové úpravy	128
9 DOPORUČENÍ PRO HKD TŘEBÍČ.....	131
ZÁVĚR	134
Seznam použitých zdrojů	136
Seznam příloh	141

ÚVOD

Laserové technologie jsou dostupné člověku již více než 50 let a tato technologie se neustále vyvíjí a postupem času si vybudovala nenahraditelnou pozici v lidském světě. Díky své velké univerzálnosti se tato technologie používá v nejrůznějších odvětvích průmyslu od strojírenství, stavitelství, přes elektrotechniku až po lékařství. Ve strojírenství se velice často používá pro dělení materiálů, svařování a také k tepelnému zpracování materiálu. Laserové řezání využívá usměrněnou energii svazků fotonů, díky čemuž je schopno obrábět různé druhy materiálu [1,2].

Laserovým řezáním se zabývá firma HDK Třebíč, a.s. se sídlem v Třebíči, která podala námět pro vypracování této diplomové práce. Firma se kromě laserového řezání zabývá CNC ohraňováním, svařováním, ohýbáním či zámečnickými pracemi. Pro laserové řezání tato firma využívá CO₂ laser AMADA.

Firma dodala dva hlavní důvody pro sepsání této diplomové práce. První z nich bylo experimentální odzkoušení doporučených parametru laserového stroje firmou AMADA o proti parametrům experimentálně navržených a následné vyhodnocení kvality řezu. Druhý podmět pro sepsání práce bylo porovnání laserového řezání, řezání na vodním paprsku, řezání plazmou a výroba na vysekávacím lise. Tento podmět byl studentem zpracován jako porovnání nekonvenčních metod, tedy oblasti, do které se chystá firma HKD Třebíč v blízké budoucnosti investovat.



Obrázek 1 Metody nekonvenčního obrábění [3, 4, 5, 6]

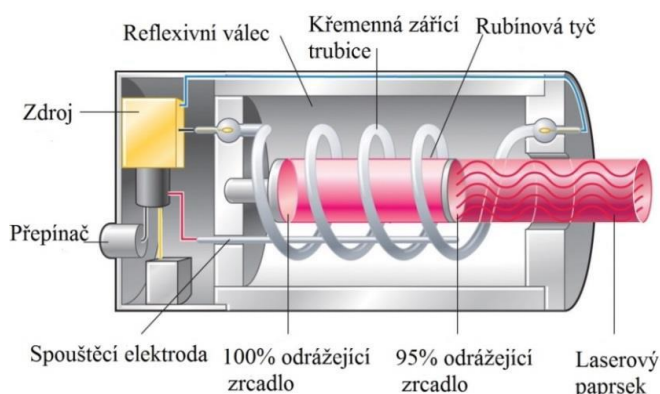
1 PRINCIP TECHNOLOGIE ŘEZÁNÍ LASEROVÝM PAPSKEM

Základní součástí všech laserových technologií je laser. Termín laser je vytvořen jako zkratka anglických slov označující Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Tento anglický název můžeme do češtiny přeložit jako zesilování světla stimulovanou emisí záření.

Laser je kvantový generátor a zesilovač koherentního (vnitřně uspořádaného, sfázovaného) optického záření, které vyniká extrémní monochromaticností (tj. všechny fotony tohoto záření mají stejnou „barvu“, respektive vlnovou délku a frekvenci), nízkou rozbíhavostí (divergencí) svazku (všechny fotony laserového záření se pohybují stejným směrem) a vysokou hustotou přenášeného výkonu či energie.

Laser se řadí mezi takzvané nekonvenční paprskové technologie. Za pomoci nekonvenčních neboli fyzikálních technologií dochází k obrábění materiálů na základě jejich úběru chemickým nebo fyzikálním způsobem. Při nekonvenčním obrábění materiálů nedochází k přímému styku obráběného materiálu s nástrojem, jedná se o způsob bezdotykového obrábění založeného na bezkontaktním působení nástroje na obráběný materiál. Na rozdíl od konvenčního obrábění materiálů, založeného na principu mechanického úběru materiálu při nekonvenčním obrábění, nevznikají třísky

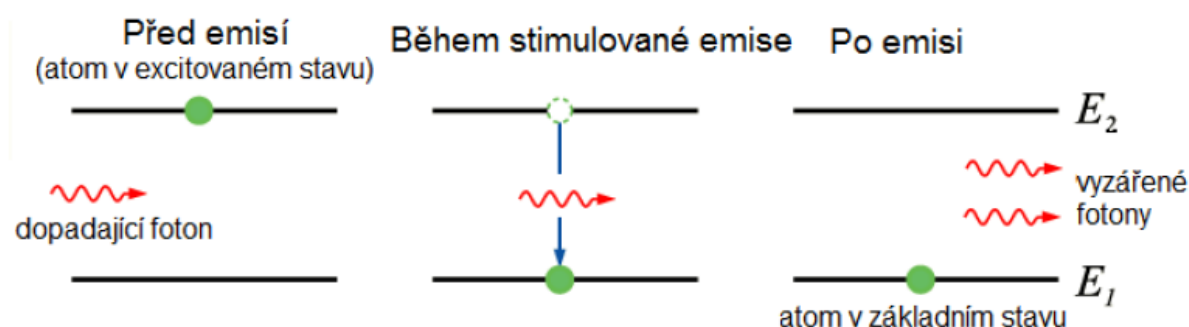
Laserový princip byl fyzikálně popsán v roce 1917 Albertem Einsteinem, který jako první objevil a popsal podstatu stimulované emise záření a podstatu laseru. Vycházel ze základů kvantové elektrotechniky, které pět let před ním zformulovali M. Planck a N. Bohr. První laser byl sestaven v roce 1960 Theodorem Maimanem. A jeho princip byl založen na aktivním prostředí ze syntetického rubínového krystalu. [7, 8]



Obrázek 2 Schéma prvního laseru [9]

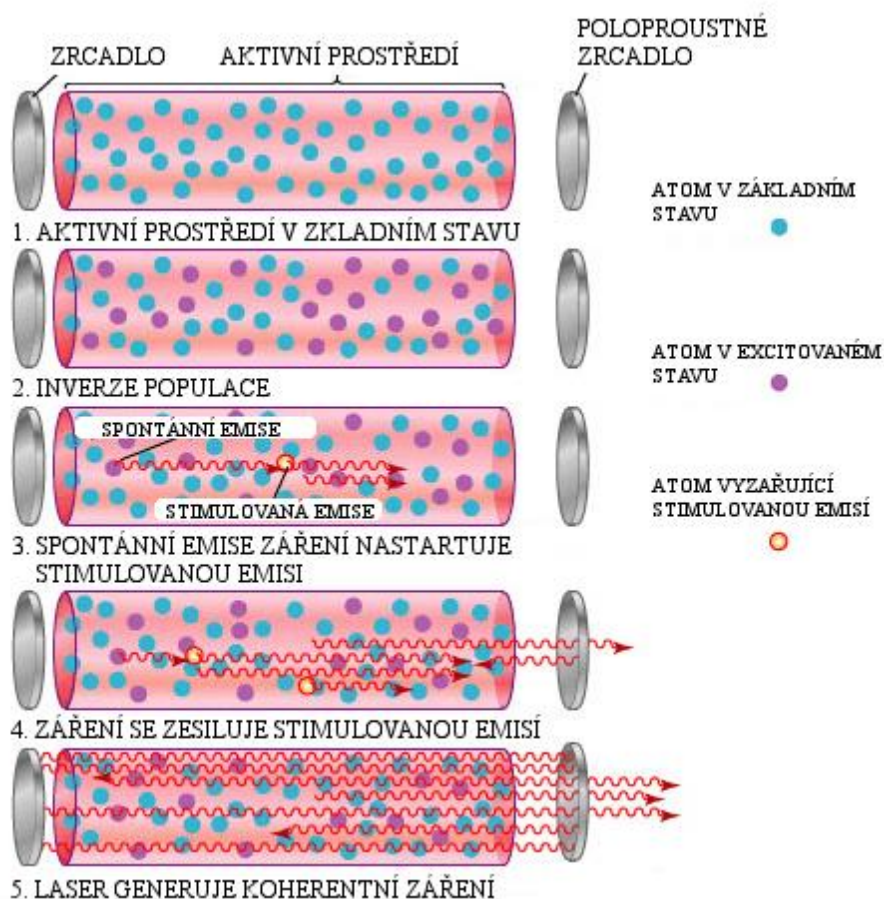
1.1 Základní princip činnosti laseru

Každý laser funguje na principu aktivního prostředí, které je tvořeno látkou, jejíž atomy se mohou nacházet jak ve vybuzeném neboli excitovaném stavu, tak v základním stavu o nižší energii. Přičemž se nemusí vždy jednat pouze o atomy, ale mohou to být rovněž různé chemické vazby nebo vibrační stavy molekul. Při přechodu atomu z vyšší energetické hladiny do nižší energetické hladiny dochází k uvolnění fotonu, který může být definován také jako kvantum elektromagnetického záření. Celý tento proces doprovázející vyzáření fotonu bývá v odborné literatuře označován jako zářivý přechod. Tento děj je zcela spontánní. Pro prostředí, v němž k zářivému přechodu dojde, zůstává ve stavu o nejnižší možné energii. V prostředí dochází k takzvanému termodynamickému stavu rovnováhy. Hlavním cílem takzvaného buzení je narušit základní stav aktivního prostředí, tedy konkrétních atomů, čímž dojde k přechodu atomů do excitovaného neboli vybuzeného stavu. Za inverzní populaci je označován stav, kdy se většina atomů nachází ve stavu s vyšší energií. [7, 8]



Obrázek 3 Průběh stimulované emise [10]

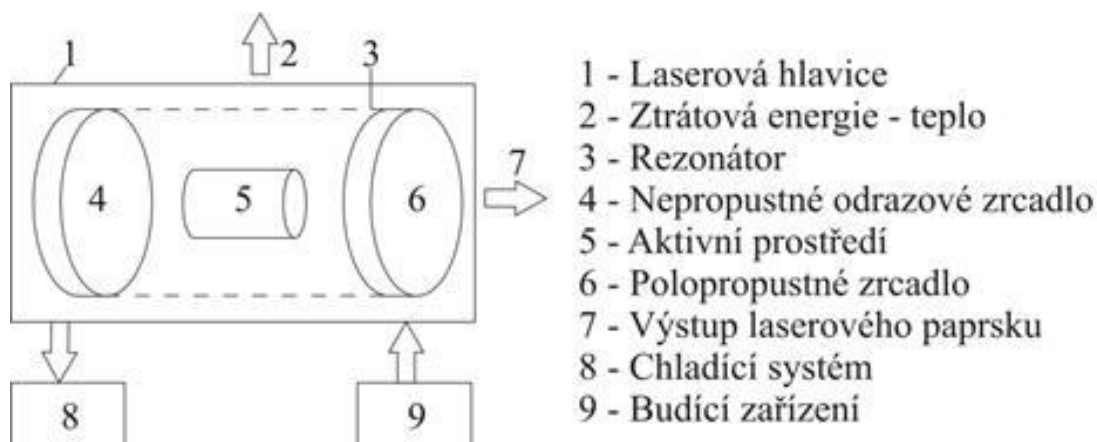
Inverze populace je tedy základním předpokladem pro vznik laserového záření. Při tomto procesu dochází k dodání energie aktivnímu prostředí a tato energie se následně pomocí stimulované emise přeměňuje na laserový svazek. Laserový svazek je totiž tvořen proudem vyzářených fotonů. Pokud začnou fotony dopadat na ostatní atomy ve vybuzeném neboli excitovaném stavu, začíná docházet k lavinovému efektu, kdy i všechny ostatní atomy začínají přecházet z vyšší energetické hladiny do nižší energetické hladiny, což je doprovázeno emisí dalších fotonů. K zesílení proudu fotonů se využívají zrcadla, která jsou umístěna v rezonátoru laseru. Díky rapidnímu nárůstu počtu fotonů za pomoci zrcadel vzniká laserový svazek. [7, 8]



Obrázek 4 Obecný princip laseru [10]

Mezi základní části každého typu laserových generátorů patří (obr. 4) [11]:

- aktivní prostředí,
- zdroj čerpání – buzení,
- rezonátor.



Obrázek 5 Schéma laseru [11]

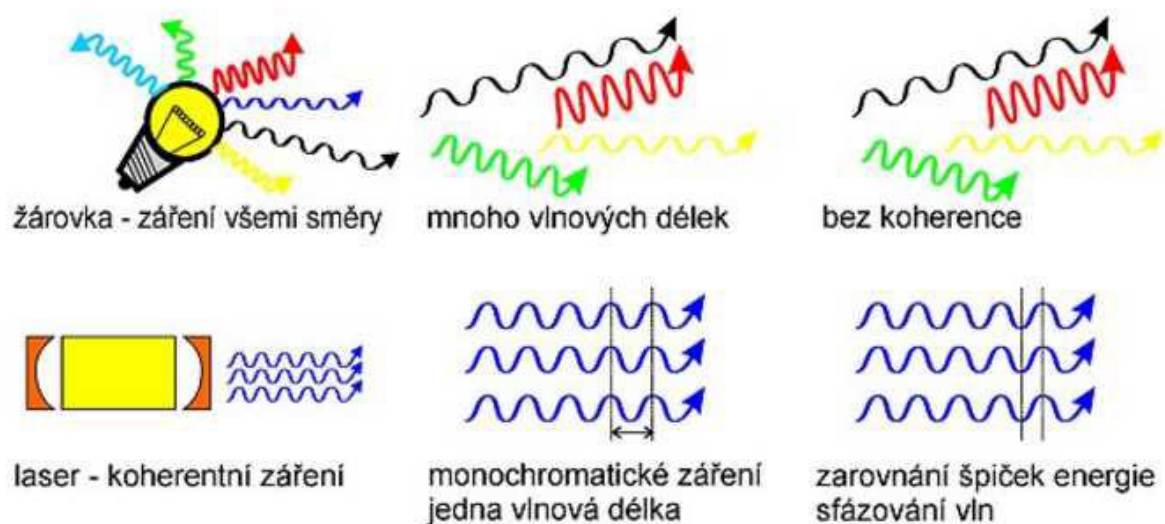
1.2 Vlastnosti laserového paprsku

Pro laserový paprsek jsou typické zcela specifické vlastnosti. Tato jedinečnost spočívá především v tom, že za pomoci stimulované emise dochází k zachování stejné energie, tedy i frekvence, stejného směru, stejné polarizace i stejné fáze, jak dopadajícího tak fotonu, tak emitovaného fotonu. Na základě tohoto zjištění jsme schopni definovat následující vlastnosti laserového svazku.

Pro laserový svazek jsou charakteristické následující vlastnosti:

1. Laserový svazek je kolimovaný, což znamená, že se laserový svazek nerozsbíhá a záření je realizováno ve formě tenkého paprsku.
2. Laserový svazek je monochromatický, což znamená, že laserový paprsek má pouze jednu barvu.
3. Laserový paprsek je koherentní, což znamená, že se jedná o jednu zcela synchronizovanou vlnu.
4. Laserový paprsek je zaostřený svazek do jednoho bodu o velmi malé plošce.
5. Laserový paprsek a s ním spojený laserový záblesk je velmi krátký a trvá přibližně pouze 0,000 000 000 000 001 sekundy.

Přesným opakem laserového záření je klasický zdroj světla, pod nímž si můžeme představit žárovku. Klasická žárovka generuje záření zcela chaoticky, na základě čehož můžeme paprsek označit za zcela nekoherentní, za paprsek o náhodné fázi a o různých vlnových délkách. Proces, při kterém dochází k zaostření paprsku do malé plošky, se nazývá fokusace a využívá se především v průmyslu za účelem vytvoření velké hustoty energie, která se využívá k obrábění tvrdých materiálů. [12, 13]



Obrázek 6 Rozdílné vlastnosti paprsku světelných zdrojů. [14]

1.3 Druhy laserů

Lasery se pro své velké uplatnění mohou dělit podle různých hledisek, jejich základní princip je však stejný, liší se realizací jednotlivých částí a konstrukcí. Nejčastěji se používá rozdělení podle několika kritérií [15]:

a) Rozdělení laserů dle aktivního prostředí:

- plynové,
- pevnolátkové:
 - tyčové,
 - diskové,
 - vláknové,
- kapalinové,
- polovodičové.

b) Rozdělení laserů dle režimu provozu:

- kontinuální,
- pulzní.

c) Rozdělení laserů podle způsobu buzení:

- opticky,
- elektrickým výbojem,
- chemickou reakcí,

- elektronovým svazkem, atd.

d) Rozdělení laserů podle oblasti vlnové délky záření:

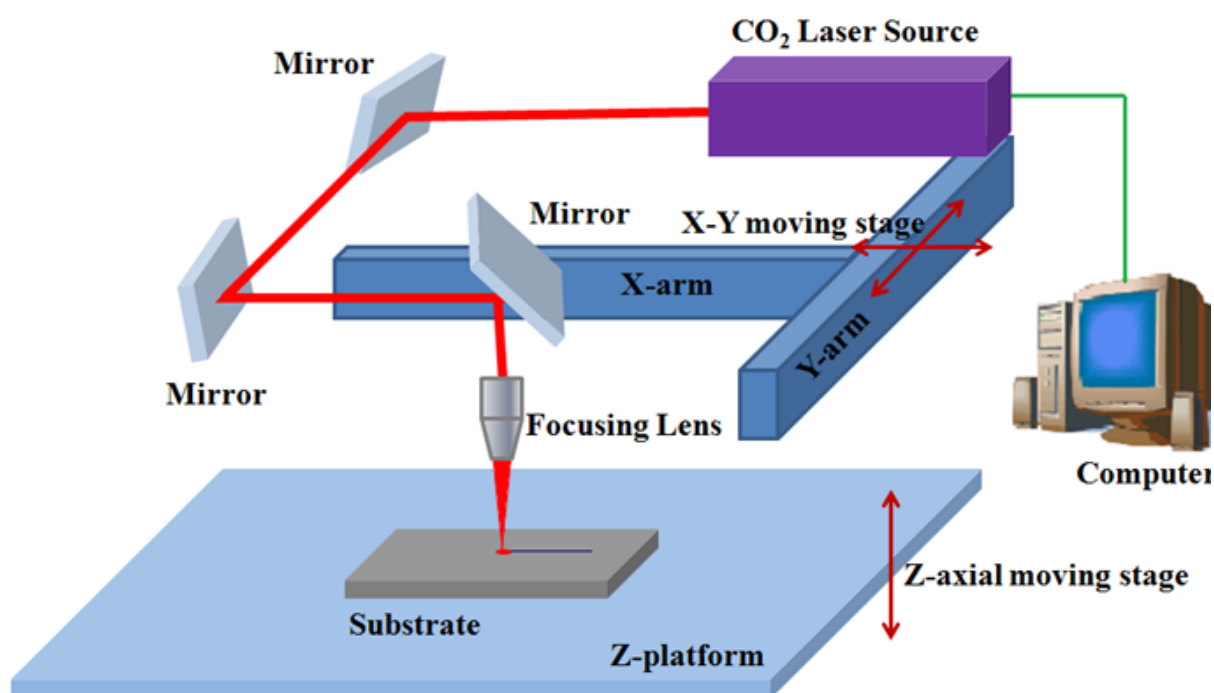
- infračervené,
- ultrafialové,
- rentgenové,
- viditelné světlo.

1.3.1 Plynové lasery CO₂ Laser

Laserové světlo je u CO₂ laserů přenášeno pomocí CO₂ molekul. Molekula CO₂ se skládá z jednoho atomu uhlíku a dvou atomů kyslíku. Tyto molekuly vytvoří řetězec, kde atom uhlíku leží mezi atomy kyslíku. Pokud je molekula vzrušená, začne vibrovat. Různé formy vibrací odpovídají rozdílně vysokým hodnotám energie. Laserový proces v CO₂ laseru zahrnuje čtyři úrovně energie. [16; 17]

Aktivní laserové médium nespočívá pouze v CO₂. Je to směs hélia, dusíku a oxidu uhličitého. Hélium a dusík jsou pomocné plyny. Podporují skutečný laserový proces v molekule CO₂. [18]

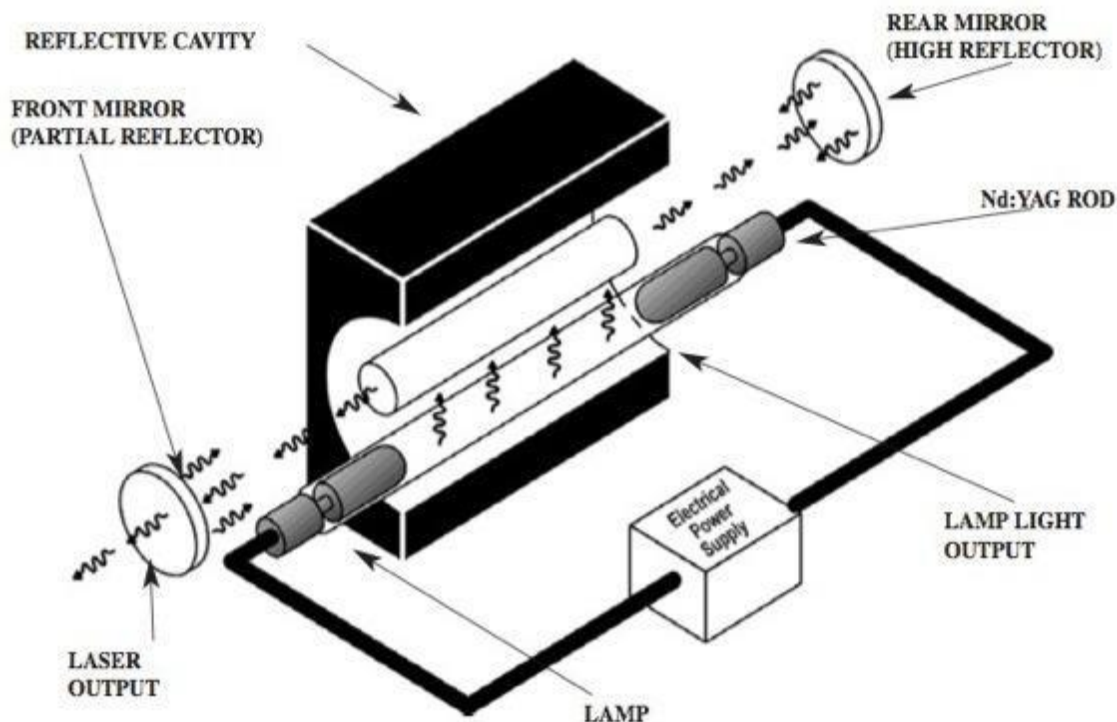
Výstupní výkon laserů CO₂ je obvykle v rozmezí od 1 W do 20 kW. Ve srovnání s vláknovým laserem dosahují CO₂ lasery mnohem vyšší výkon, ale mají nižší účinnost 10-20% a vyšší provozní náklady. [16]



Obrázek 7 Princip CO₂ laseru [19]

1.3.2 Nd:YAG Laser

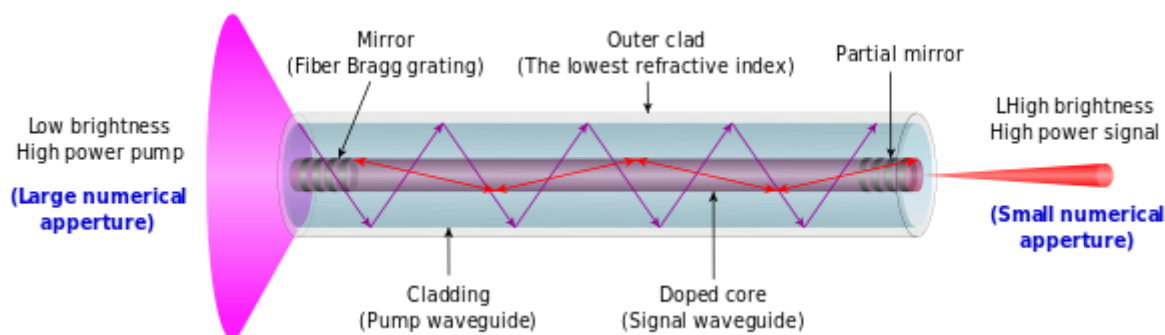
Jméno tohoto typického zástupce laseru pochází z izotropního krystalového yttrium hlinitého granátu, který je dopovaný atomy neodymu. Vlnová délka v tomto laserovém typu je 1064 nm, která může být výhodně použita při zachování laserového paprsku přes flexibilní optické vlákno. Pro buzení jsou používány lampy nebo laserové diody. Tyto lasery mohou pracovat v pulzním nebo v nepřetržitém režimu. Nd: YAG laser dosahuje maximálního výstupního výkonu 6kW. [7; 20; 17]



Obrázek 8 Princip Nd:YAG laseru [21]

1.3.3 Vláknový laser

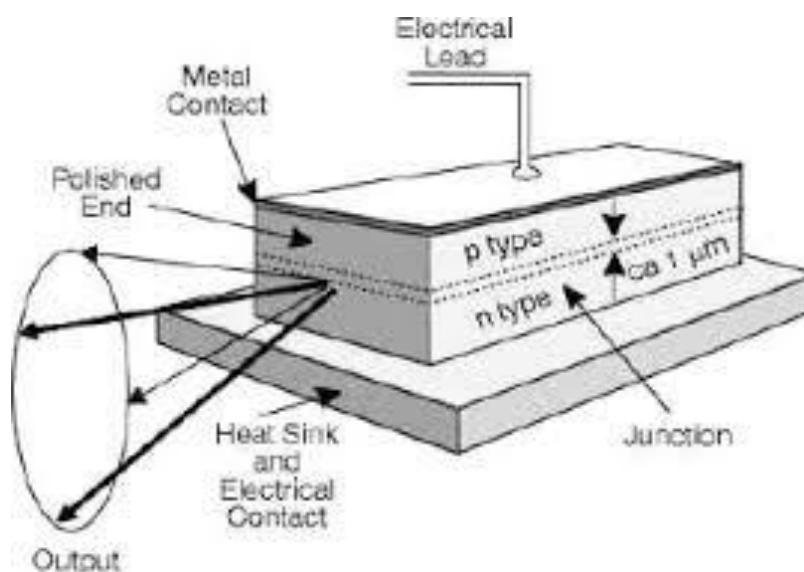
Vláknový laser je technologicky nejmodernější polovodičový laser. Aktivní médium laseru je velmi tenké a dlouhé optické vlákno, které je dopované yterbiem. Toto optické vlákno také slouží jako rezonátor, místo toho jsou klasické dielektrické zrcadla nahrazeny Braggovými mřížemi, které poskytují optickou zpětnou vazbu. Vlnová délka je 1,07 mikronů. Účinnost tohoto laseru je v rozmezí 30-35%. Lasery mohou pracovat v nepřetržitém a pulzním režimu. Vláknový laser je velmi jednoduchý, protože laser je vyroben z optických a laserových modulů. Spojení těchto laserových modulů může zvýšit výkon až na 100 kW. Dalšími výhodami jsou vynikající kvalita, dlouhá životnost a malá údržba. Nevýhodou je vysoká kupní cena. V kontinuálním režimu se používají vláknové lasery pro řezání a svařování. V pulzním režimu se většinou používají pro gravírování a značení. [7, 22, 23]



Obrázek 9 Schematický diagram cladding-pumped double-clad fibre laseru [24]

1.3.4 Polovodičový laser

Diodové nebo polovodičové lasery patří do skupiny laserů v pevné fázi. Aktivní médium těchto laserů je laserová dioda. Diodové lasery mají elektrickou účinnost 25-55%, protože přeměňují elektřinu přímo na světlo. Vlnová délka je od 0,8 do 0,98 mikronů. Pracují také pulzně a v nepřetržitém režimu. Mohou pracovat s vysokým výkonem a malými rozměry. Nevýhody jsou divergence paprsku, velká teplotní závislost na polovodičovém materiálu a vysoká cena. V současné době se diodové lasery používají pro pájení, lepení, svařování. [7; 25]



Obrázek 10 Princip diodového laseru [26]

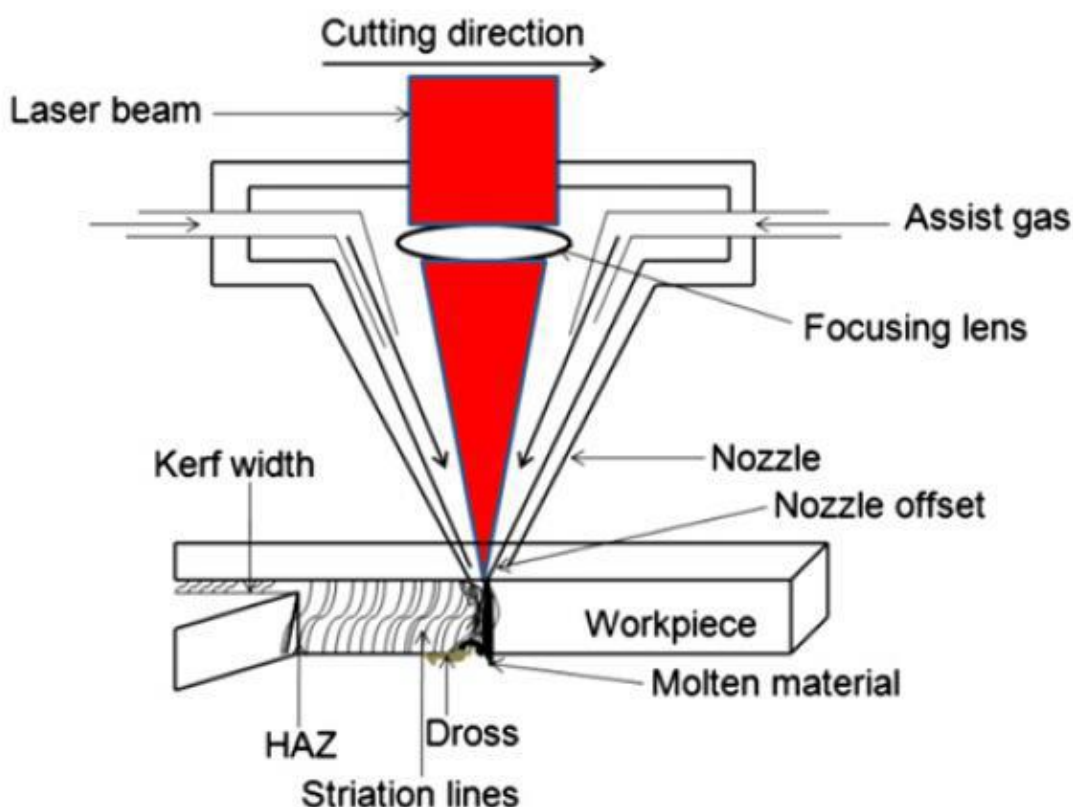
1.4 Princip a metody řezání laserem

Řezání laserem je jedním z nekonvenčních řezacích procesů, které se nejčastěji používají pro vytváření složitých tvarů a různých geometrií téměř ve všech kategoriích materiálů, jako jsou kovy, nekovy, keramika a kompozity. V laserovém řezacím stroji je zdrojem energie laser, který zaměřuje optickou energii na povrch obrobku. Vysoce koncentrovaný zdroj energie, s vysokou hustotou, taví a odpařuje

část obrobku řízeným způsobem. Tento proces se používá k obrábění různých kovových a nekovových materiálů. [8; 27]

Pro laserové řezání jsou v současné době nejčastěji používané lasery CO₂ a vláknové lasery. Ale každý typ laserů má určité výhody a nevýhody.

Existují tři nejčastěji používané metody pro řezání laserem: oxidační řezání, řezání tavné a sublimační řezání. Tyto metody se vzájemně liší řeznou rychlostí, výkonem laserového paprsku, použitelností pro různé materiály a nejvíce v typech řezného plynu. Při řezání může být také použita kombinace těchto metod. [8]



Obrázek 11 Diagram laserového řezání [27]

1.4.1 Tavné řezání

Princip tohoto typu laserového řezání spočívá v tavení materiálu a ve vyfukování taveniny z kerfu inertním plynem. Inertním plynem je nejčastěji argon nebo dusík. Inertní plyn znamená, že plyn nereaguje s roztaveným kovem a nezúčastňuje se řezacího procesu, ale izoluje odříznuté hrany od vzduchu. Protože pokud vzduch reaguje s okrajem řezné hrany, začne hrana oxidovat a materiál bude muset být obráběn. Argon a dusík patří mezi velmi drahé plyny a pro řezání fúzí je zapotřebí vysoká spotřeba těchto plynů. Například dusík se spotřebovává asi 50 N.m³ / h

tlakem 15 barů, což činí tuto metodu velmi drahou. Tato metoda používá laser s vysokým výkonem při nižší řezné rychlosti. Výsledkem je vysoce kvalitní řez. Tato metoda je vhodná pro řezání nerezových ocelí a neželezných materiálů. [7, 28, 17]

1.4.2 Oxidační řezání

Plamenné či oxidační řezání je v zásadě stejné jako při řezání fúzí. Rozdíl je pouze v použití kyslíku jako řezného plynu. V průběhu řezání vzniká exotermická reakce působením kyslíku na horký kov. Výsledkem je delší ohřev materiálu. To umožňuje použít velmi vysoké řezné rychlosti, až dvojnásobné oproti fúznímu a sublimačnímu řezání. Ve srovnání s metodou tavného řezání má oxidační řezání širší a hrubší kerf, kvalita řezu je horší a tepelně ovlivněná zóna je také větší. Metoda není vhodná pro vytváření malých otvorů, ostrých tvarů a obrysů složitého tvaru. Nevýhodou tohoto způsobu je oxidová vrstva, která se vytváří na řezných plochách. Pokud jsou díly později lakovány, musí být oxidovaná vrstva předem odstraněna. Při této metodě dochází k nízké spotřebě plynu, přibližně $2 \text{ N.m}^3 / \text{h}$ při tlaku 1 až 6 barů. Tato metoda se nejčastěji používá pro konstrukční uhlíkovou ocel. [7; 28; 29]

1.4.3 Sublimační řezání

Přímé odpařování materiálu z řezné plochy je hlavním symbolem sublimačního řezání. Tato metoda může produkovat velmi přesné a kvalitní řezy, ale je zapotřebí vysoká intenzita laserového záření. Toto laserové záření je dosaženo vhodným nastavením parametrů laseru a zaostřovací optiky. Sublimační řezání také využívá inertní plyn, který zabraňuje oxidaci materiálu a napomáhá odstranění materiálu. Tento princip se používá hlavně pro řezání tenkých vrstev. Nejčastěji se sublimační řezání používá pro řezání nekovových materiálů. [29; 30]

1.5 Technologické parametry laserového řezání

Při řezání laserem je důležité správné nastavení řezných parametrů. Kvalita a přesnost řezu závisí na dobrém nastavení těchto parametrů.

Parametry řezání jsou zvoleny s ohledem na řezaný materiál a jeho vlastnosti. Například: typ materiálu a jeho chemické složení, viskozita taveniny, tepelná vodivost, absorpční kapacita, tloušťka materiálu, velmi důležitý je i způsob řezání.

Hlavními řeznými parametry jsou řezná síla, řezná rychlost, vlnová délka, laserový

režim, frekvence, zatížení (frekvence pracovního cyklu), ohnisková vzdálenost laserového paprsku, typ řezného plynu, tlak řezného plynu, vzdálenost trysky od materiálu, parametry ovlivňující ostrý roh. [31; 28]

1.5.1 Výkon

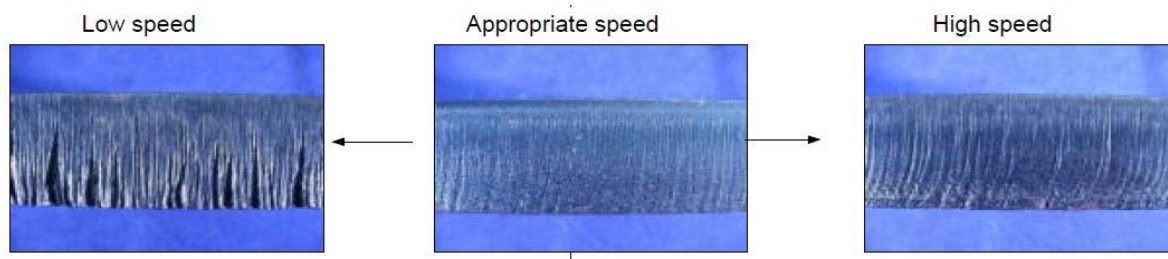
Výkon laserového paprsku závisí na druhu a tloušťce řezaného materiálu. Obecně pak platí, že se zvyšujícím se výkonem laseru roste i maximální možná tloušťka řezání. Špatné nastavení řezného výkonu laseru s ohledem na ostatní parametry řezání může znamenat výrazné zhoršení kvality řezu [31; 32]



Obrázek 12 Vliv výkonu na kvalitu [33]

1.5.2 Řezná rychlost

Řezná rychlost musí být přizpůsobena typu, tloušťce a kvalitě řezaného materiálu. Dalšími faktory, které ovlivňují rychlost, jsou typ řezání, tlak plynu, výkon a typ laseru. Pokud nejsou optimální podmínky správně nastaveny, může to mít za následek otřepy, okuje a horší kvalitu řezného povrchu. Je-li řezná rychlost vyšší, může dojít k tomu, že materiál není úplně oddělen a naopak nízká rychlost může způsobit hrubý řez materiálem. Tloušťka materiálu se zvyšuje, když se sníží rychlost řezání. [32; 34]

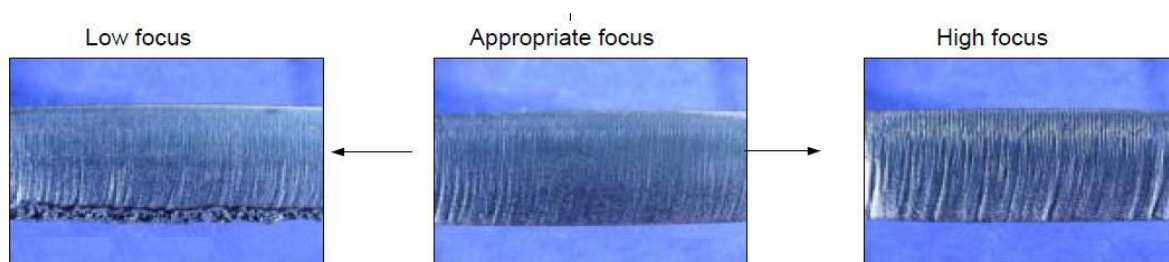


Obrázek 13 Vliv řezné rychlosti na kvalitu [33]

1.5.3 Poloha ohniska

Poloha ohniska by se dala vyjasnit jako nejmenší průměr laserového paprsku s největší energií. Poloha zaostření je zvolena podle typu řezání a typu materiálu. Pro tavné řezání je umístěna poloha ohniska na spodní straně plechu. Pro sublimační

řezání je poloha ohniska umístěna těsně u vrchní strany plechu. A pro sublimační řezání se zaměřuje na povrch materiálu. [31; 32]



Obrázek 14 Vliv polohy ohniska na kvalitu řezu [33]

1.5.4 Ohnisková vzdálenost

Ohnisková vzdálenost je určena typem řezné hlavy, respektive použitou zaostřovací čočkou nebo optikou. Obecně lze říci, že se zvyšující se ohniskovou vzdáleností se také zvyšuje průměr ohniskového bodu a délku Rayleigh, což je parametr odpovídající hloubce ostrosti. [31; 28; 32]

1.5.5 Vlnová délka

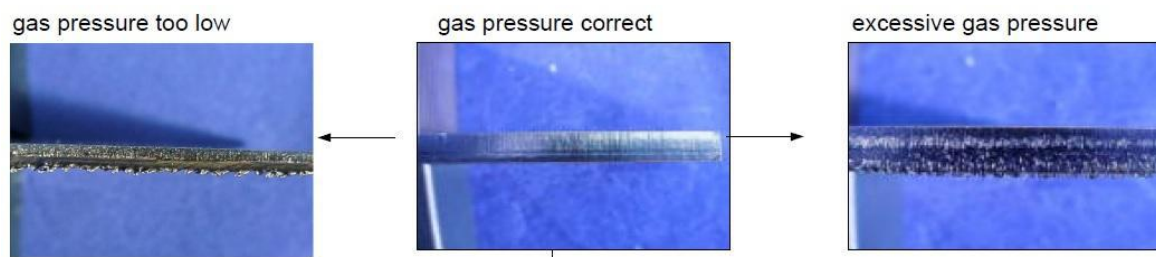
Vlnová délka má velký vliv na absorpci paprsku. Záření s kratší vlnovou délkou má lepší absorpci. Kratší vlnové délky využívají polovodičové lasery. Ve srovnání s plynovými lasery mají polovodičové lasery přibližně desetkrát menší vlnové délky. [28; 32]

1.5.6 Typ plynu

V závislosti na typu řezání laserem je zvolen plyn, který je dodáván do oblasti řezání. Při použití kyslíku se na povrchu vytvoří velmi tenká vrstva oxidu. Naopak při použití inertních plynů jako argon, dusík nebo hélium není řezná hrana zoxidována. Plyn musí být vhodně zvolen v závislosti na materiálu, který je řezán. Například kyslík není vhodný pro titan. Také nesmí být použit kyslík pro hořlavé materiály. [32; 17]

1.5.7 Tlak plynu

Dalším parametrem, který má velký vliv na kvalitu řezu, je tlak plynu. Tlak se vybírá v závislosti na tloušťce řezaného materiálu a typu laseru. Největší tlak je zvolen pro tenčí materiály a pro tlustší materiály jsou zvoleny nižší tlaky. Při použití kyslíku je nastavený tlak nižší, na rozdíl u řezání za podpory inertních plynů, kde je volba tlaku opačná. Vyšší tlak je zvolen pro tlustší tloušťku materiálu. Tlak je uveden v MPa nebo v barech. Na obr. 15 jsou znázorněny řezy, které způsobují příliš nízký tlak, optimální tlak a příliš vysoký tlak.



Obrázek 15 Vliv tlaku plynu na kvalitu řezu [17]

1.6 Ostatní použité technologie

1.6.1 Řezání vodním paprskem

Vodní paprsek patří do kategorie nekonvenčních obráběcích technologií, které nepoužívají běžné nástroje pro obrábění a řezání, ale používají modely erozního odběru materiálu. Při těchto metodách neexistuje přímý kontakt mezi nástrojem a materiálem obrobku. Vodní tryskový nástroj je představován tryskou, která tvoří vodní paprsek. Vysoký tlak vytváří ve vodním sloupci koncentrovanou energii, která podporuje erozivní účinky obráběného materiálu a tím vede k řezání. [28; 17]

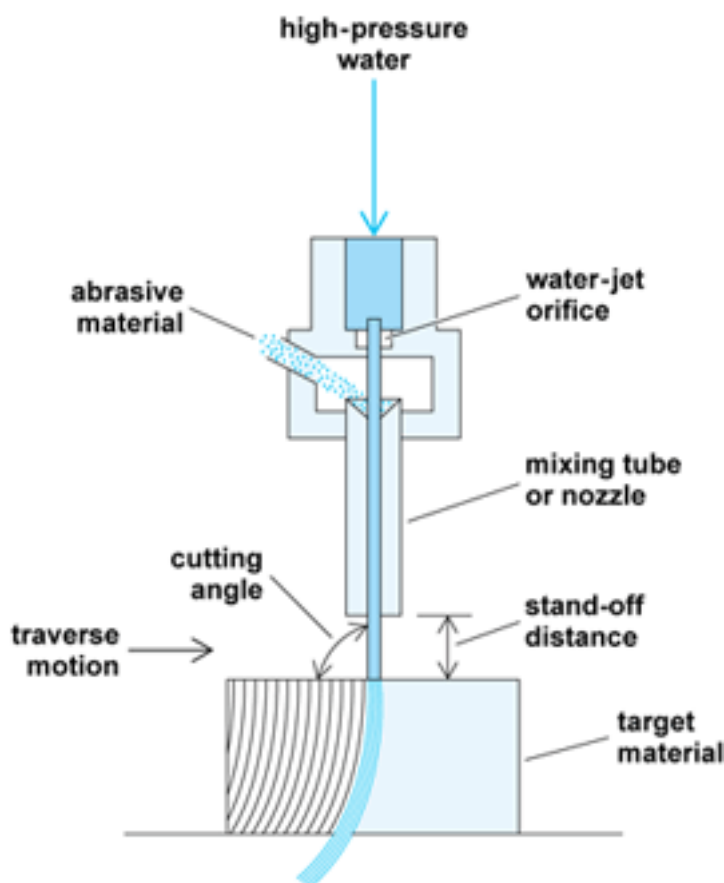


Obrázek 16 Řezání vodním paprskem [35]

Vodní technologie začala v technické oblasti v 70. letech 20. století. Vodní paprsek se začal míchat s abrazivem na počátku 80. let, což vedlo k většímu zájmu o tuto metodu. Technologie vodního paprsku se stala jednou z nejrozmanitějších metod pro řezání profilů, protože má dobrou schopnost řezat materiály s vysokou pevností pro velké tloušťky. Výhodou je řezání bez tepelného ovlivnění a řezání bez otřepů. V současné době existuje jen velmi malý počet materiálů, které nejsou vhodné pro řezání vodním paprskem. Jedním z nich je tvrzené sklo. [28, 17, 35]

Princip řezání vodním paprskem

Jak bylo uvedeno výše, tato technologie je založena na principu rozpadu řezaného materiálu, v tomto případě vyvolaného vysokým proudem vody. Vodní paprsek je generován vysokotlakými čerpadly. Vysokotlaké čerpadla se mohou lišit podle vstupního výkonu, který se pohybuje od 9 do 75 kW a průtoku vody, který činí 1,2 až 7,6 l / min. Pracovní tlak vody může být až 6500 barů. [17; 36]



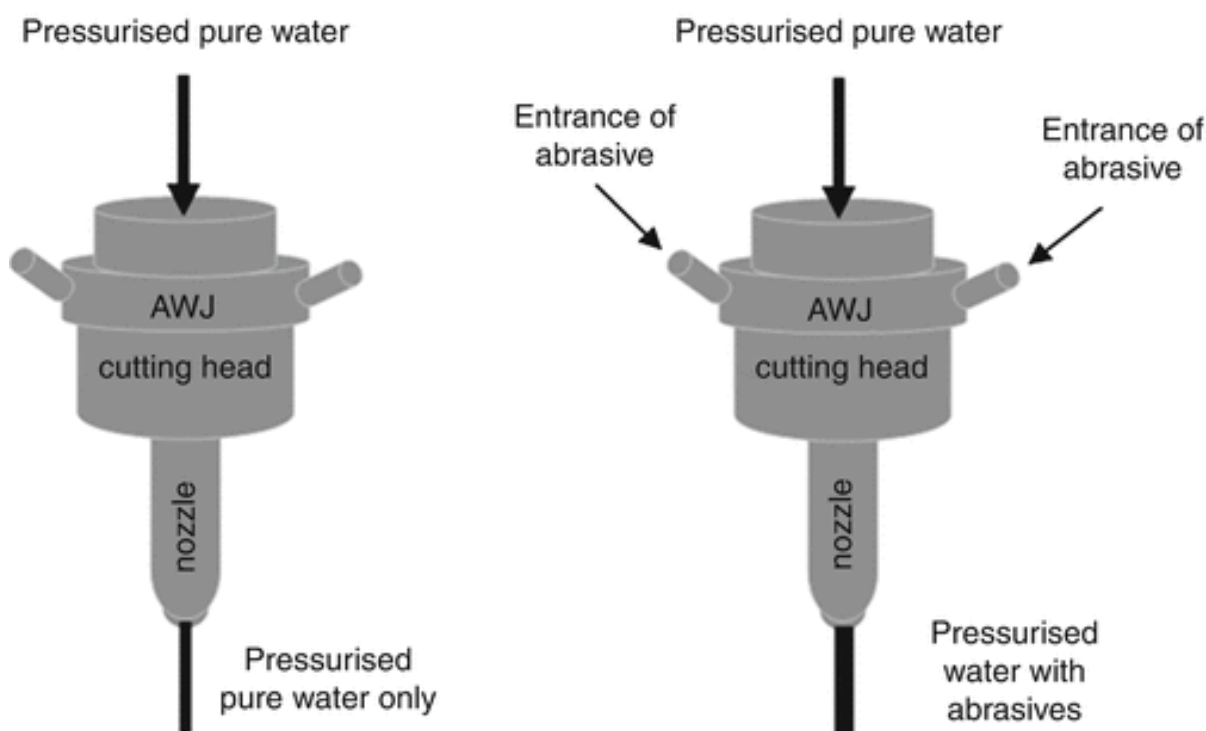
Obrázek 17 Princip řezání vodním paprskem [37]

Fyzikální základ pro řezání materiálu vodním paprskem je založen na principu toho, že se voda z paprsku pohybuje dvakrát až čtyřikrát větší rychlost než rychlost zvuku. Proces řezání je rozdělen do dvou fází. V první fázi je zatížení materiálu generována tlakem kapaliny, v materiálu se tvoří otvor. Ve druhé fázi se otvor prohlubuje do kerfu. Zjednodušeně, když vodní paprsek narazí na obrobek, na velmi malé ploše se nahromadí vysoký tlak a vytvoří se primární otvor. V materiálu se tedy začnou objevovat praskliny a mikrotrhliny. Tyto praskliny se v důsledku dynamického zatížení rychle rozšiřují a narušují řezaný materiál. [17; 37; 38]

Zatěžovací síla se od okamžiku, kdy paprsek projde celou tloušťkou materiálu, sníží. Nově vytvořená řezná plocha není tepelně ovlivněna a v důsledku tohoto procesu

nejsou žádné známky zbytkového namáhání. Tyto vlastnosti jsou zásadně odlišné ve srovnání s jinými technologiemi, které se používají pro řezání materiálů jako je laser nebo plazma, Zjednodušený princip řezání vodním paprskem je znázorněn na obr. 16. [17; 37; 38]

Existují dvě metody, řezání vodním paprskem. První z nich je čirý vodním paprskem, druhý je vodní paprsek s abrazivem. [2]



Obrázek 18 Dva typy řezání vodním paprskem [39]

1.6.2 Technologie vysekávacího lisu

Vysekávání se provádí na CNC děrovacím lisu. Tato technologie je zejména používána pro zpracování tenkého materiálu. Princip vysekávání je založen na působení smykového napětí na materiál. Když dojde k interakci mezi nástrojem a mezi materiálem, začíná oddělení materiálu mezi protilehlými hranami. Materiál se oddělí po nadměrném stříhovém napětí. [40; 41]

Vysekávací nástroj je tvořen razníkem a raznicí, které mají dostatečnou vůli potřebnou pro vysekávací proces. Obr. 19 znázorňuje příklad razníku s raznicí.



Obrázek 19 Nástroj pro vysekávací lis [40]

Vysekávání je výhodné pro tenčí materiály o tloušťce 0,3 mm až 8 mm. U nerezových plechů se maximální tloušťka mění na 4 mm. Dosažená přesnost výroby je $\pm 0,1$ mm.

Jedná se o velmi produktivní proces výroby tvarovaných dílů z plechu. Při velkém objemu vyráběných kusů je vysekávání efektivnější než řezání laserem. Často se tato technologie kombinuje právě s řezáním laserem. [8; 40; 41]

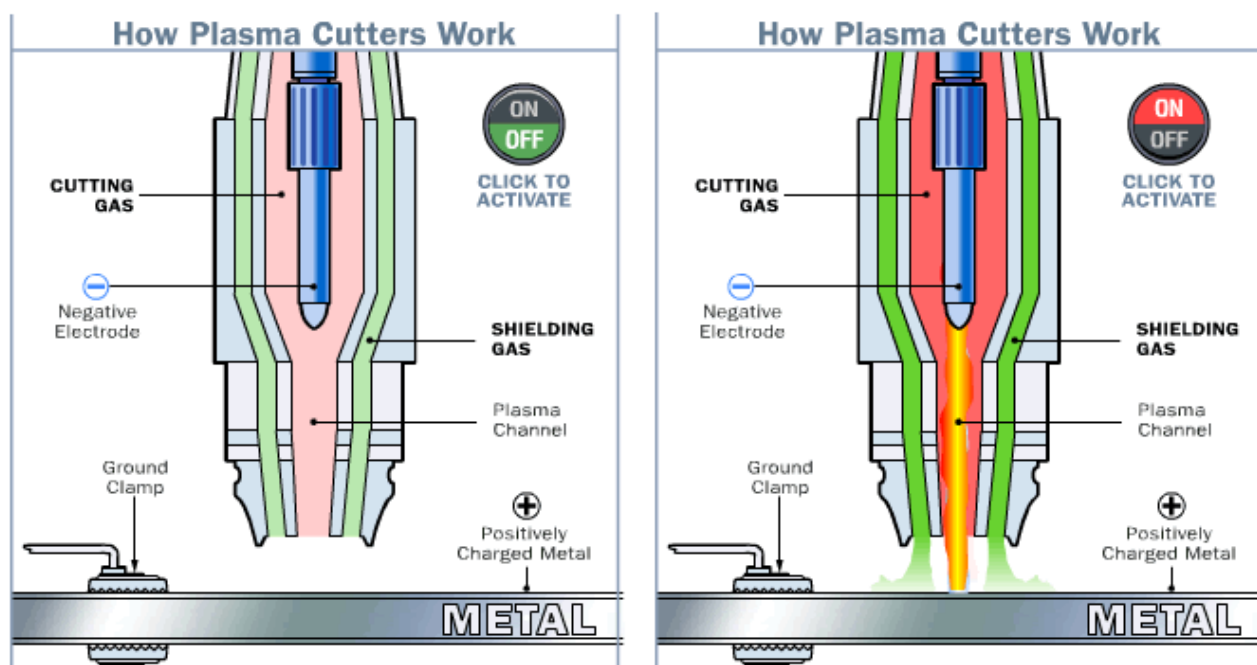
Hlavními výhodami vysekávacího lisu jsou vysoká produktivita a přesnost. Stejně jako u vodního paprsku, zpracovávaný materiál není tepelně ovlivněn. Hlavní parametry jsou: vysekávací síla, přesnost polohování a držení nástrojů, typ a návrh nástrojů, frekvence vysekávání. [40; 41]

vysekávání je vysoce produktivní technologie. Produktivitou se vysekávání rovná laserovému řezání. Dosažená přesnost a kruhovitost otvorů je vyšší než při řezání laserem. Otvor je vytvořen na jednom zdvihu nástroje. Okraj otvoru je velmi hladký, má malou drsnost a není tepelně ovlivněn. Nevýhodou jsou požadavky na speciální nástroje pro výrobu složitých tvarů. Tyto nástroje jsou většinou velmi drahé a časem

dochází k jejich otupení. Vysekávání je proto výhodně ekonomické pro velké sériové výroby. [8; 40; 41]

1.6.3 Řezání plazmou

Plazmou je možné řezat všechny elektricky vodivé materiály. Tato metoda se nejčastěji používá pro řezání uhlíkových a nerezových plechů, které mají tloušťku od 6 mm do 250 mm. Plazma může řezat bronz, hliník, hořčík, železo, měď, mosaz, molybden, nikl, titan, wolfram. Princip této metody je založen na tepelných účincích a dynamických účincích plazmy. Plazmový paprsek v procesu řezání prochází celou tloušťkou materiálu. Materiál se roztaví a sublimuje kvůli vysoké teplotě plazmatu a rychlosti přenosu tepla. Tavenina se z kerfu odstraní ve formě jemně atomizované kapaliny. [17; 29]



Obrázek 20 Princip řezání plazmou [44]

Plazma je plyn, který obsahuje volné náboje, jmenovitě elektrony a ionty. Plazma silně reaguje na elektrické a magnetické pole. Jako celek je elektricky neutrální. Plazmový hořák se skládá z trysky a netavitelné elektrody. Elektrický oblouk hoří mezi nimi. Plazmový plyn je dodáván kolem elektrody a nejčastěji je to argon. Mohou to být také další plyny, jako je směs argonu a vodíku, helia, dusíku, kyslíku, oxidu uhličitého, vzduchu. Plazmový plyn se přemění na plazmu pomocí energie elektrického oblouku. Počáteční oblouk slouží pouze k zapálení hořáku. Potom se oblouk přeruší a zapálí se oblouk mezi elektrodou a materiálem. Tímto dochází k řezání. Teplota plazmy závisí na typu plazmového plynu. [42, 43]

Tabulka 1 Použití plynu pro vytvoření plasmy a jejich provozní teplota [42]

Plasma gas	Helium	Argon	Hydrogen	Nitrogen
Plasma temperature [°C]	20000	15000	8000	7000

Následující parametry mají vliv na kvalitu řezání: průměr trysky, zdroje energie pro elektrický oblouk, typ plazmového plynu, vzdálenost mezi hořákem a materiálem, rychlost posuvu plazmového hořáku, úhel sklonu. Tyto parametry musí být vhodně zvoleny s ohledem na materiál, který se bude řezat.

Plazmové řezání je produktivní a univerzální způsob řezání, který v současnosti nahrazuje řezání kyslíkem. Plazmové řezání je produktivní ve střední tloušťce materiálu, tedy kolem 160 mm. Plazmové řezání je velmi hlučný proces, hluk může být snížen díky řezání pod vodou. Při řezání plazmou vzniká velké množství škodlivých plynů a výparů, proto je nutné zajistit odsávání.

Plazmové řezání má mnohem větší tepelně ovlivněnou zónu materiálu, než je tomu u laserového řezání. Teplo ovlivněná zóna plazmového řezání je v rozmezí od 4 mm do 10 mm. [17; 42; 45]

2 TECHNOLOGICKÉ MOŽNOSTI LASEROVÉHO PAPRSKU

Široké využití nacházejí lasery především v průmyslu. Za pomoci laserů je možné provádět následující činnosti [46]

2.1 Svařování laserem

Svařování laserem představuje mnoho výhod ve srovnání s klasickými metodami. K hlavním výhodám svařování laserem patří velmi malá deformace svařence, vysoká rychlost svařování laserem, poměrně malá tepelně ovlivněná plocha sváru nebo vysoká pevnost sváru. Velmi běžné je při svařování laserem využití CO₂ laserů, diodových laserů nebo neodymových laserů. S pomocí laserů je možné svařovat i velmi obtížně svařitelné materiály, mezi které se řadí například hliník, niob, titan nebo zlato. [46]

2.2 Vrtání laserem

Hlavní výhodou vrtání laserem je to, že za pomoci laseru lze vrtat i na velmi problematicky přístupných místech, kde by to s využitím klasických metod bylo téměř nemožné. S pomocí laseru je možné vrtat díry o průměru od 10 mm do 100 mm. Díry vrtané laserem mohou být jak kruhové, tak dokonce tvarové. S využitím laseru je možné vrtat díry do plastů, dřeva, kovů, textilu, keramiky, skla a jiných přírodních materiálů. V průmyslu se vrtání laserem využívá především při výrobě vstřikovacích trysek, filtrů nebo při výrobě lopatek proudových motorů. Při vrtání laserem se nejčastěji využívají především CO₂ lasery, dále excimerové a neodymové lasery. [46]

2.3 Řezání laserem

S pomocí laseru je možné řezat i takové materiály, které jsou s využitím konvenčních technologií prakticky neobrobitelné. Laser je vhodné využít především při řezání korozivzdorné oceli, konstrukční oceli nebo při řezání slitin hliníku. Při řezání se využívají především CO₂ lasery a rovněž neodymové lasery. [46]

2.4 Dekorace skla laserem

Princip dekorace skla laserem spočívá v řezání laserem. Pokud na sklo dopadne laserový paprsek, dochází k částečnému odpaření skla a k jeho následnému povrchovému popraskání. Právě zmíněné povrchové popraskání vytváří při dopadu světla zářivý vzhled. Za účelem dekorace skla se v současné době využívají především CO₂ lasery, přičemž se v poslední době začínají uplatňovat rovněž

neodymové lasery, které se využívají pro vytváření trojrozměrných objektů ve skle. [46]

2.5 Značení, značkování a popis laserem

Značení laserem spočívá ve většině případů v odpaření materiálu v místě, kde dopadne laserový paprsek. S pomocí laserů je možné označovat téměř všechny materiály. Této možnosti laseru se využívá především v průmyslu, kde jsou s využitím laserů označovány nekalené i kalené ocele, litiny, titan, hliník a slitiny hliníku, bronz, mosaz a rovněž plasty. Velkou výhodou označování laserem je skutečnost, že je možné označovat obrobky s jakoukoliv povrchovou úpravou a obrobky jakéhokoliv tvaru. Za účelem popisování se využívají především CO₂ lasery, excimerové a neodymové lasery. [46]

2.6 Gravírování (mikrofrézování) laserem

Rozdíl mezi popisováním a gravírováním spočívá v hloubce popisu. Pokud se jedná o větší hloubku popisu, hovoříme o gravírování. Gravírování spočívá ve vytváření reliéfů nejenom do kalených ocelí, ale rovněž do dřeva, keramiky nebo gumy. Při gravírování se využívají především CO₂ lasery a neodymové lasery. [46]

2.7 Tepelné zpracování laserem

Pro tepelné zpracování materiálu laserem je typická krátká doba ohřevu malého množství materiálu. Pod pojmem tepelné zpracování materiálu se skrývají následující procesy: žíhání, kalení, popouštění, amorfizace povrchu, tepelné zpevnění povrchu nebo rázové zpevnění povrchu. Mezi nesporné výhody laserového kalení patří skutečnost, že tepelné zpracování je možné provést i na místech, která jsou pouze velmi problematičtěji přístupná. Za účelem tepelného zpracování se využívají především výkonné CO₂ lasery a diodové lasery.

2.8 Nanášení ochranných a otěruvzdorných povlaků laserem

Nanášení ochranných a otěruvzdorných povlaků laserem spočívá v umístění drátku nebo přivádění prášku do laserového paprsku. V laserovém paprsku dochází k natavení drátku nebo prášku a jeho následnému přilnutí k povrchu obrobku. Na povrchu obrobku nanesený povlak rychle tuhne. Velká výhoda nanášení ochranných a otěruvzdorných povlaků laserem spočívá především v tom, že nanesený povlak k obrobku velmi dobře přilne a že se v naneseném povlaku nevytvářejí trhliny,

příčemž tloušťka povrchu může být maximálně 1 mm. Za tímto účelem se využívají především nejrozšířenější CO₂ lasery. [46]

2.9 Soustružení laserem

Soustružení laserem se nejčastěji realizuje za pomoci dvou nezávislých laserových paprsků. Za pomoci dvou samostatných laserových paprsků dochází k ubírání materiálu z obrobku. Při laserovém soustružení se nejčastěji využívají nejrozšířenější CO₂ lasery a dále neodymové lasery. [46]

2.10 Frézování laserem

Pro frézování laserem platí stejné vlastnosti, jako jsou výše uvedeny v kapitole s názvem Soustružení laserem. [46]

2.11 Využití laserů v ostatních odvětvích

Ačkoliv jsme se doposud zaměřili především na využití laserů ve strojírenství, tak lasery mají široké uplatnění rovněž v mnoha dalších odvětvích, mezi které patří například stavební průmysl a s ním související geodezie, astronomie, medicína, ekologie, meteorologie, geofyzika, jaderná fyzika, elektronika a vojenský průmysl. Podle mnoha uznávaných vědců se objev laserového paprsku řadí k jednomu z nejvýznamnějších objevů 20. století. V souvislosti s objevením laserového paprsku bylo rovněž uděleno velké množství Nobelových cen. [47]

3 ROZBOR POUŽÍVANÝCH MATERIÁLŮ, VÝBĚR PŘEDSTAVITELŮ

3.1 Rozbor používaných materiálů

Hlavním předpokladem pro to, aby mohla být využita energie laserového paprsku při obrábění, je nutnost obráběného materiálu pohlcovat laserové záření. V tomto případě se energie laserového paprsku přeměňuje na teplo. Za základní předpoklad laserového zpracování materiálů lze tedy považovat schopnost absorpce laserového záření obráběným materiálem. Energii, která dopadá na obráběný materiál, lze rozdělit do 3 základních skupin: procházející, odražená a absorbovaná energie. U neprůhledných materiálů a kovů definujeme nulovou procházející energii. Na základě tohoto tvrzení jsme schopni definovat, že reflexivita neboli odrazivost obráběného materiálu představuje opačnou hodnotu absorpce, přičemž právě absorpce obráběného materiálu je nejvíce ovlivňována vlnovou délkou laserového záření dopadajícího na obráběný materiál, dále druhem obráběného materiálu, stejně jako způsobem polarizace, teplotou a také stavem povrchu obráběného materiálu. Leštěné kovové povrchy vystavené infračervenému záření disponují skutečně vysokou reflektivitou, jež ještě narůstá v souvislosti s vlnovou délkou záření. Hodnota absorpce u kovů souvisí s elektrickou a tepelnou vodivostí konkrétního kovu. Z tohoto důvodu kovy o dobré vodivosti disponují vysokou reflektivitou záření. Proto se zpracování některých ušlechtilých a barevných kovů a jejich slitin za využití CO₂ laserů jeví jako velmi obtížné a prakticky až nemožné, jelikož tento typ laseru pracuje na vlnové délce 10,6 μm. Jako náhrada CO₂ laserů se v tomto případě doporučuje využít výkonné pevnolátkové lasery na bázi Nd:YAG nebo na bázi Yb:YAG. Pro tyto lasery je typické laserové záření o vlnové délce přibližně 1 μm. Na druhou stranu tento typ laserů, tedy pevnolátkové lasery, nemůže být využit při obrábění nekovových materiálů. Mezi tyto materiály se řadí sklo, textil, plasty a kompozitní materiály. Výše zmíněné materiály nejsou schopny pohltit záření pevnolátkových laserů a z tohoto důvodu je nutné využít CO₂ laser. Teplota obráběného materiálu hraje důležitou roli v absorpci záření. Platí, že čím vyšší je teplota obráběného materiálu, tím vyšší je i absorpce laserového záření obráběným materiálem. Na absorpci laserového záření má dále vliv drsnost povrchu, povlaky, povrchové oxidy a podobně. Nicméně v souvislosti s reflektivitou lze konstatovat, že reflektivita klesá s rostoucí drsností obráběného povrchu. To znamená, že zvýšení absorpce obráběného materiálu lze dosáhnout následujícími způsoby: mořením, zdrsňením

povrchu, předehřátím povrchu nebo vytvořením vhodného absorpčního povrchu. [48;49;50].

3.1.1 Kovové materiály

a) Uhlíkové a nízkolegované oceli

K nejčastěji řezaným materiálům laserem patří uhlíkové a nízkolegované oceli. Nespornou výhodou ocelí je, že poměrně dobře absorbují laserové záření rovněž ze vzdálenějších oblastí infračerveného spektra. Všeobecně výhodné je využít výkonné CO₂ lasery k řezání tlustších materiálů. V případě tlustších materiálů se volí typ laseru v závislosti na požadavcích na čistotu řezu. Zatímco s využitím oxidačního řezání je možné řezat materiál až o tloušťce okolo 25 mm, při požadavku na čistý řez bez okují je všeobecně doporučováno tavné řezání dusíkem. Na druhou stranu na tavné řezání tenkých plechů je vhodné využít vláknový nebo diskový laser, jehož nespornou výhodou je vyšší řezná rychlost. V současné době je na trhu dostupné velké množství produktů předurčených přímo pro řezání laserem. Výrobci hutních polotovarů tak přichází na trh s novými materiály, které splňují velmi přísná kritéria související s požadavky nejenom na velmi čistý řez, ale rovněž na požadovanou produktivitu výroby. [48;49;50; 51].

b) Vysokolegované a korozivzdorné oceli

Mezi materiály běžně zpracovávané laserovým řezáním patří právě vysokolegované a korozivzdorné oceli. Za účelem zpracování těchto materiálů se využívá tavné řezání dusíkem. Rychlejší řezné rychlosti je sice možné dosáhnout oxidačním řezáním, ale tento způsob řezání vede k znehodnocení materiálu v blízkosti místa řezu. Pro vysokolegované a korozivzdorné oceli je charakteristická pomalejší řezná rychlost než pro řezání v předcházející kapitole zmíněných uhlíkových ocelí. S tím souvisí také fakt, že se provádí řez vysokolegovaných a korozivzdorných ocelí o menších tloušťkách, než jsou řezány uhlíkové oceli. Za účelem řezání tlustších plechů je vhodné využít plazmu, ačkoliv se bude jednat pouze o hrubé dělení. Při řezání vysokolegovaných a korozivzdorných ocelí se všeobecně doporučuje používat takzvané ukládací rošty z totožného materiálu, z jakého je obráběný materiál. Hlavní důvod spočívá v tom, že při využití ukládacích roštů ze stejného materiálu, nebude docházet k degradaci materiálu výpalku. Za účelem ochrany již upravených povrchů plechů (například broušených nebo leštěných plechů) je vhodné použít krycí

ochrannou fólii. I v tomto případě lze v současné době koupit fólie, upravené speciálně pro řezání laserem. [52; 53].

c) Hliník a jeho slitiny

Hliník a jeho slitiny všeobecně vyžadují při zpracování větší pozornost. To je způsobeno především specifickými vlastnostmi hliníku a jeho slitin. Při laserovém řezání hliníku a jeho slitin je nutné užít takzvaný asistenční plyn, pro hliník a jeho slitiny se běžně používá dusík, nicméně možné je použít i kyslík nebo argon. Pokud je jako asistenční plyn zvolen kyslík, vzniká problém s utvářením povrchové vrstvy oxidů. Tato vrstva oxidů má vysokou teplotu tání, což způsobuje, že se na obráběném materiálu vytváří velmi tvrdá slupka, která dále komplikuje pronikání kyslíku k tavenině. Při zpracovávání hliníku a jeho slitin se všeobecně doporučuje užívat pevnolátkové lasery, jelikož CO₂ lasery nejsou schopny vzhledem k velké tepelné vodivosti hliníku a jeho slitin jeho efektivního zpracování. Vzhledem k tomu, že čistý hliník je velmi měkký kov, v praxi se setkáváme především se slitinami hliníku a nejčastěji s duralem. Čím je hliník čistější, tím problematičtější je i jeho řezání. Problém spočívá především ve tvorbě otřepů. Jedním ze způsobů, jak zjednodušit laserové řezání čistého hliníku, je eloxování, s jehož pomocí dojde ke zvýšení absorpce laserového záření obráběného materiálu. [52; 53].

d) Titan

Pro titan je charakteristické, že se za vyšších teplot jedná o vysoce reaktivní materiál. Z tohoto důvodu se při zpracování titanu laserem nedoporučuje užívat jako asistenční plyn kyslík ani dusík. Tyto asistenční plyny způsobují zabarvení řezné plochy. Obzvláště nebezpečná je však úprava tenkých materiálů za použití kyslíku. V takovém případě může dojít dokonce k nekontrolovanému vzplanutí a následně požáru. Další nevýhodou použití kyslíku a dusíku je, že s použitím těchto plynů dochází na obráběném materiálu ke vzniku křehkých a zároveň velmi tvrdých nitridů a oxidů. V této povrchové vrstvě mohou vznikat trhliny. Za nejvhodnější asistenční plyn při laserovém řezání titanu je považován čistý argon, popřípadě směs argonu a hélia. S využitím doporučených plynů vzniká čistý a velmi kvalitní řez. [52; 28; 53].

e) Měď a mosaz

Velké problémy při laserovém řezání mědi vznikají v souvislosti s její reflektivitou a velkou tepelnou vodivostí. Laserové řezání mosazi představuje o něco menší

problémy, jelikož pro mosaz je charakteristická menší reflektivita a tepelná vodivost než pro měď. Laserové řezání mědi je možné za pomoci zařízení k pohlcování odrazů, jímž musí být laser vybaven. V opačném případě hrozí poškození stroje. Pro laserové řezání mědi a mosazi se doporučuje používat pevnolátkové lasery, jejichž záření je ve srovnání s CO₂ lasery lépe absorbovatelné. Za účelem laserové řezání mědi se používá jako asistenční plyn především kyslík a za účelem řezání mosazi lze jako asistenční plyn zvolit rovněž dusík. [52; 53].

f) Niklové slitiny

Mezi nejběžněji používané průmyslové niklové slitiny patří Nimonic, Inconel, Monel a Hasteloy. Pro řezání těchto slitin se doporučuje zvolit za asistenční plyn dusík. Za asistenční plyn lze zvolit i kyslík, s jehož použitím lze zvýšit řeznou rychlost, ale na úkor vzniku okují na povrchu řezu a otřepů. [52; 53].

g) Zlato a stříbro

Hlavní příčinou problémů spojených s laserovým řezáním zlata a stříbra je jejich vysoká reflektivita. Ačkoliv se jedná o složitý proces, za specifických podmínek je však realizovatelný. Laserové řezání zlata a stříbra se uplatňuje především ve šperkařství. Všeobecně se za účelem laserového řezání zlata a stříbra doporučuje použít pulzní pevnolátkový laser. [54].

3.1.2 Nekovové materiály

Za hlavní představitele nekovových materiálů můžeme označit textil, dřevo, papír nebo plasty. Za účelem laserového řezání těchto materiálů se používají především CO₂ lasery, přičemž v souvislosti se zvoleným materiálem je možné použít i jiný typ laseru. V souvislosti s laserovým řezáním nekovových materiálů je vždy nutné mít na paměti, že velmi často vznikají nezdravé dýmy a výpary. Tyto škodliviny je nutné z prostor odsávat. Dalším rizikem spojeným s laserovým řezáním nekovový křehkých materiálu spočívá ve vzniku prasklin (sklo nebo keramika). Praskliny ve skle nebo keramice vznikají z důvodu nerovnoměrného tepelného zatížení. Pro řezání plastů a konkrétně termoplastů, tedy polyetylen, polypropylen nebo polystyren se všeobecně doporučuje použít tavné řezání. Tento způsob řezání spočívá v tom, že tekutý materiál je z řezné spáry vyfouknut tlakem plynu. Pro tento způsob řezání je charakteristický velmi čistý řez a vysoká řezná rychlost. Zatímco při laserovém řezání akrylu, plexiskla nebo polyacetátu se doporučuje zvolit způsob řezání za pomoci

odpaření materiálů. Za pomoci prudkého zahřátí těchto materiálů dochází k jejich rychlému tavení a následnému odpaření. Díky těmto vlastnostem vzniká velmi hladký a tudíž kvalitní řez. Při laserovém řezání textilu, dřeva, kůže, papíru, kompozitních materiálů a některých vybraných plastů (polyuretan a PVC) se používá chemická degradace. Chemická degradace spočívá v narušení původních chemických vazeb konkrétního materiálu. Zjednodušeně řečeno po prudkém zahřátí laserovým paprskem konkrétní materiál shoří. Na základě procesu chemické degradace vznikají velmi kvalitní řezy, které bývají obvykle pokryty vrstvičkou uhlíkového prachu. [28;50].

3.2 Výběr představitelů

V této části jsou popsány materiály běžně používané ve firmě HKD Třebíč, které byly vybrány pro experiment.

3.2.1 DC01

Materiál DC01 je nelegovaná hlubokotažná ocel vhodná pro tváření za studena, pokovování za tepla, organické povlaky nebo jiné povlaky. Tento materiál je také vhodný pro svařování. Základní konstrukcí oceli je feritová slitina. Procento jednotlivých chemických prvků této oceli je uvedeno v tabulce 3.

Tabulka 2 Značení materiálu DC01 [55]

By CSN	By EN	By W.Nr
41 1321	DC01	1.0330

Tabulka 3 Chemické složení oceli DC01[55]

Chemical composition [hm. %]						
C	Si	Mn	P	S	Al	N ₂
0,0400	0,0060	0,2140	0,0090	0,0090	0,0310	0,0035

3.2.2 S235JR

Materiál S235JR je nelegovaná nízkouhlíková konstrukční ocel obecné jakosti. Tato ocel se používá pro konstrukční díly strojů v menších tloušťkách, tavné svařování, staticky a dynamicky naložené součásti. Základní ocel není tepelně zpracována a má zaručenou svařitelnost. Procento jednotlivých chemických prvků této oceli je uvedeno v tabulce 5.

Tabulka 4 Značení oceli S235JR [55]

By CSN	By EN	By W.Nr
41 1375	S235JR	1.0120

Tabulka 5 Chemické složení oceli S235JR [55]

Chemical composition [hm. %]						
Thickness	C	Si	Al	S	Cu	Mo
3 mm	0,140	0,010	0,034	0,005	0,020	0,002
6 mm	0,160	0,010	0,040	0,007	0,010	0,002
Chemical composition [hm. %]						
Thickness	V	Mn	P	N	Cr	Ni
3 mm	0,001	0,510	0,006	0,004	0,021	0,010
6 mm	0,001	0,520	0,014	0,003	0,013	0,007

3.2.3 C45

Materiál C45 je nelegovaná konstrukční uhlíková ocel vhodná k zušlechťování a povrchovému kalení. Tento materiál je určen pro středně namáhané strojní součásti ve stavbě automobilů, železničních vozů, strojů, motorů, přístrojů a čepů. Tato ocel je obtížně svařitelná. Jedná se o feriticko-perlitickou strukturu základního materiálu. Procentuální zastoupení jednotlivých chemických prvků uvedeno v tab. 9, ve které je uvedeno dovolené množství prvků v materiálu a specifické chemické složení pro každou tloušťku materiálu.

Tabulka 6 Chemické značení oceli C45 [56]

Chemické složení [hm. %]					
	C	Si	Mn	P	S
3 mm	0,489	0,250	0,780	0,009	0,002
6 mm	0,450	0,240	0,710	0,011	0,001

3.2.4 EN X5CrNi18-10

Jedná se o korozivzdornou austenitickou ocel obsahující 18% chromu a 10% niklu. Austenitická gama fáze je paramagnetická, ocel je tedy nemagnetická. Ocel má

vynikající odolnost proti korozi v prostředích jako např. voda a ovzduší bez koncentrace chloridů nebo anorganických kyselin a solí. Svařitelnost této oceli je zaručena.

Tabulka 7 Chemické vlastnosti EN X5CrNi18-10 [56]

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]
max 0,07	max 1,00	max 2,00	max 0,045	max 0,030	17 - 20	9 - 11,5

Tabulka 8 Mechanické vlastnosti [56]

Mez kluzu R_e max [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A_{50} min [%]
185	490 - 685	37

3.2.5 Hliníková slitina AlMg3

Ekvivalentem pro AlMg3 (dle EN) jsou 42 4413 (dle ČSN) a 3.3535 (dle značení W.Nr.). Tato slitina hliníku je středně pevná, nevytvrzovatelná, odolná proti korozi, mořské vodě a ropickým podmínkám. Je velmi dobře leštitelná, dobře svařitelná a obrobitelná. Požívá se pro potravinářský a chemický průmysl, stavbu vozidel a plavidel, nosné konstrukce, výměníky tepla, ochranné kryty a další.

Tabulka 9 Chemické vlastnosti AlMg3 podany petr 8 [57]

Si [%]	Cu [%]	Mg [%]	Mn [%]	Cr [%]	Ti [%]	Zn [%]
0,40	0,10	3,60	0,50	0,30	0,15	0,20

4 EXPERIMENTÁLNÍ ODZKOUŠENÍ PARAMETRŮ LASEROVÉHO ŘEZÁNÍ PRO JEDNOTLIVÉ MATERIÁLOVÉ PŘEDSTAVITELE

4.1 Cíl experimentu

Cílem experimentální části je odzkoušení parametrů laserového řezání pro jednotlivé materiály uvedené v kapitole 3.2.

Podklady pro téma této diplomové práce byly dány firmou HKD Třebíč.

4.1.1 Představení společnosti HKD Třebíč

HKD Třebíč se zabývá výrobou kovových výrobků, jako jsou kompletní integrované kryty, elektropříslušenství a ovládací panely, nádrže na chladicí kapaliny a další výrobky z ocelových plechů a svařence podle požadavků zákazníka. Největší částí výroby jsou krycí plechy pro CNC broušení. Hlavním zákazníkem firmy je výrobce CNC brusek z Německa. Produkce firmy HDK Třebíč je postavena na laserovém řezacím stroji a na povrchové úpravě výrobků. Všechny výrobní činnosti odpovídají systému řízení jakosti podle ČSN EN ISO 9001: 2009, který je certifikován společností TÜV International

HKD Třebíč se nachází v České republice ve městě Třebíč. Společnost byla založena v roce 1951. Postupným vývojem, různými organizačními změnami a vymezeními získala společnost současnou formu a obchodní název, který byl používán od roku 1992.

HKD Třebíč zaměstnává 120 pracovníků a jejich roční obrat činí 2,8 milionu eur. [41]

4.2 Výroba vzorků

Všechny vzorky v této části experimentu byly vyrobeny na laserovém pracovišti firmy HKD Třebíč a konkrétně na CO₂ laseru Amada LC 4020 metodou oxidačního i tavného řezání. Vzorky byly páleny z materiálů představených v kapitole 3.2. Nastavení řezných parametrů laseru pro jednotlivé materiály je popsáno u každého materiálu v následujících podkapitolách.

Pro experiment byly použity tloušťky plechu 3 mm a 6 mm tedy nejpoužívanější tloušťky firmou HKD Třebíč.

Pro každý zmíněný materiál bylo vyrobeno minimálně 10 kusů vzorku za pomoci nastavení 10ti různých parametrů stroje. Jelikož výsledkem experimentu je co možná nekvalitnější výrobek, byly za pomoci technologa, paliče firmy HKD Třebíč a studenta

vybrány dva vzhledově nejlépe vypálené vzorky z každého plechu. Ty byly následně v dalších kapitolách zkoumány a testovány. Tudíž pro každou jakost plechu jsou v tabulkách uvedeny pouze dvojce parametry nastavení laseru, kterými byly zmíněné nejlepší výpalky vyrobeny.

Pro výběr nejlepších vzorků pro experiment byly aplikovány následující prvky výběru:

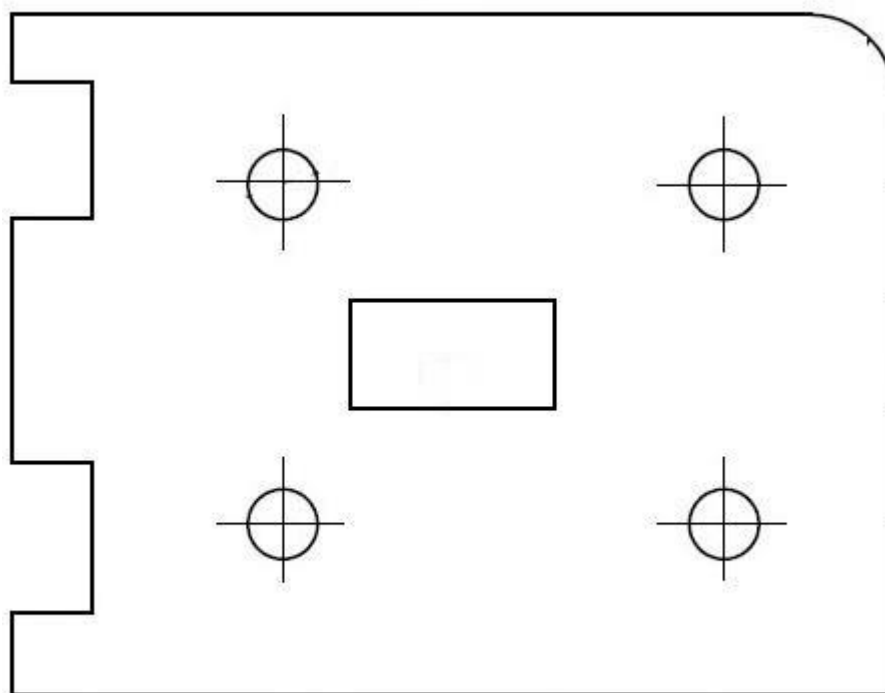
1. Bezproblémový řez, plech byl proříznut v celém průřezu
2. Řezná hrana bez znatelných otřepů
3. Řezná plocha bez znatelných nerovností
4. Kolmé rohy bez narušení pravého úhlu
5. Vnitřní otvory na vzorku bez zbytkového materiálu
6. Celkový vzhled vzorku



Obrázek 21 Laser AMADA LC 4020

Popis vzorku:

Tvar vzorků pro experiment byl diskutován s konstruktéry i technologi firmy HKD Třebíč. A byl navržen vzorek, na kterém se vyskytují všechny obvyklé obrazce, které mají standartní výrobky firmy (čtvercový otvor, kruhový otvor, zaoblení, kolmé rohy...). Základní tvar vzorku je vidět na obrázku 21 níže. Detailní výkres vzorku je v příloze 1.



Obrázek 22 Základní tvar vzorku

4.2.1 DC01**A) DC01_3 mm**

V tabulce 10 jsou znázorněny parametry použité pro výrobu vzorků z plechu DC01 tloušťky 3 mm, které prošly výběrovým kritériem. Každý vzorek dostal své označení a to konkrétně 31DC01, 32DC01, 3VDC01. Pod tabulkou jsou popsány detaily parametrů nastavení stroje u těchto vzorků.

Tabulka 10 Přehled nastavení parametrů pro řezání materiálu DC01_3 mm

Material: DC01 Thickness: 3 mm						
No.	Feed rate [mm/min]	Power [W]	Freq	Duty [%]	Gas Press [MPa]	Gas kind
31DC01	2500	2000	1500	77	6	O
32DC01	2700	3000	2200	95	6	O
3VDC01	1400	3000	1350	90	15	Vzduch

31DC01

Parametry použité pro výrobu tohoto vzorky jsou doporučené parametry od dodavatele laseru, firmy AMADA a firma HKD Třebíč je běžně používá při výrobě. Jako řezný plyn byl použit kyslík.

32DC01

Pro vzorek 32DC01 byl jako řezný plyn použit také kyslík. Řezný výkon, se oproti doporučenému zvýšil. Řezná rychlost byla také zvýšena.

3VDC01

Pro tento vzorek byl jako řezný plyn použit obyčejný vzduch. Výhoda řezání vzduchem je v tom, že na řezném povrchu nevzniká tenká vrstva okují. Protože vzduch tolik nepodporuje hoření na rozdíl od kyslíku, byl použit větší tlak plynu a řezná rychlost byla snížena.

B) DC01_6 mm

V tabulce 11 jsou znázorněny parametry použité pro výrobu vzorků z plechu DC01 tloušťky 6 mm, které prošly výběrovým kritériem. Každý vzorek dostal své označení a to konkrétně 61DC01, 62DC01, 6VDC01. Pod tabulkou jsou popsány detaily parametrů nastavení stroje u těchto vzorků.

Tabulka 11 Přehled nastavení parametrů pro řezání materiálu DC01_6 mm

Material: DC01 Thickness: 6 mm						
No.	Feed rate [mm/min]	Power [W]	Freq	Duty [%]	Gas Press [MPa]	Gas kind
61DC01	2000	2000	2200	100	6	O
62DC01	2500	3000	2200	88	6	O
6VDC01	1000	3000	1350	90	15	Vzduch

61DC01

Dodavatel laserového stroje AMADA opět doporučil parametry pro řezání oceli a firma HKD Třebíč je využívá bez upravení při výrobě z plechu DC01 tloušťky 6 mm. Doporučený řezný plyn je kyslík.

62DC01

Pro vzorek 62DC01 byl stejně jako pro předchozí vzorek použit jako řezný plyn kyslík. Řezný výkon, se oproti doporučenému zvýšil. Řezná rychlost byla také zvýšena.

6VDC01

Poslední vzorek, který prošel výběrem, byl označen 6VDC01. Pro tento vzorek byl jako řezný plyn použit obyčejný vzduch. Jelikož vzduch tolik nepodporuje hoření na rozdíl od kyslíku, byl použit větší tlak plynu a zároveň byla při výrobě použita nižší řezná rychlost.

4.2.2 S235JR**A) S235JR_3 mm**

V následující tabulce 12 jsou zapsány parametry použité pro výrobu vzorků z plechu jakosti S235JR tloušťky 3 mm, které prošly výběrovým kritériem. Každý vzorek dostal své označení a to konkrétně 31S235JR, 32S235JR, 3VS235JR. Pod tabulkou je rozebráno nastavení řezných parametrů u těchto vzorků.

Tabulka 12 Přehled nastavení parametrů pro řezání materiálu S235JR_3 mm

Material: S235JR				Thickness: 3 mm		
No.	Feed rate [mm/min]	Power [W]	Freq	Duty [%]	Gas Press [MPa]	Gas kind
31S235JR	2500	2000	1500	77	6	O
32S235JR	2700	3000	2200	95	6	O
3VS235JR	1400	3000	1350	90	15	Vzduch

31S235JR

Vzorek značený jako 31S235JR byl vyroben za použití doporučených parametrů firmou AMADA.

32S235JR

Další vzorek z materiálů S235JR, který prošel výběrem, byl vyroben za podmínek uvedených v tabulce XX. Oproti doporučeným parametrům byl při pálení zvýšen výkon, řezná rychlost a frekvence.

3VS235JR

Pro vzorek tohoto označení byl použit čistý vzduch jako řezný plyn. Z toho důvodu byl zvýšen tlak plynu a řezná rychlost byla stejně jako frekvence snížena.

B) S235JR_6 mm

V tabulce 13 znázorňuje parametry použité pro výrobu vzorků z plechu DC01 tloušťky 6 mm, které prošly výběrovým kritériem. Každý vzorek dostal své označení a to konkrétně 61DC01, 62DC01, 6VDC01. Pod tabulkou jsou popsány detaily parametrů nastavení stroje u těchto vzorků.

Tabulka 13 Přehled nastavení parametrů pro řezání materiálu S235JR_6 mm

Material: S235JR				Thickness: 6 mm		
No.	Feed rate [mm/min]	Power [W]	Freq	Duty [%]	Gas Press [MPa]	Gas kind
61S235JR	2000	2000	1500	100	6	O
62S235JR	2500	3000	2200	88	6	O
6VS235JR	1000	3000	1350	90	15	Vzduch

61S235JR

Vzorek značený jako 31S235JR byl vyroben za použití doporučených parametrů firmou AMADA.

62S235JR

U vzorku značeného S235JR, byly oproti doporučeným parametrům následující změny: řezný výkon byl zvýšen zároveň s řeznou rychlostí a frekvencí.

6VS235JR

Pro vzorek značený 6VS235JR byl použit kyslík jako řezný plyn. A jak tomu bylo zatím u všech případů, tlak byl zvýšen, ale frekvence a rychlost řezání byly sníženy.

4.2.3 C45**A) C45_3 mm**

Tabulka 14 uvádí řezné parametry, které byly uvedeny pro výrobu vzorků z plechu jakosti C45 o tloušťce 3 mm. Vzorky byly označeny následovně 31C45, 32C45, 3VC45. Parametry jsou popsány pod tabulkou.

Tabulka 14 Přehled nastavení parametrů pro řezání materiálu C45_3 mm

Material: C45		Thickness: 3 mm				
No.	Feed rate [mm/min]	Power [W]	Freq	Duty [%]	Gas Press [MPa]	Gas kind
31C45	2500	2000	1500	77	6	O
32C45	2700	3000	2200	95	6	O
3VC45	1400	3000	1350	90	15	Vzduch

31C45

Parametry laserového stroje pro výrobu tohoto vzorku jsou doporučené firmou AMADA. Toto nastavení je běžně používáno při výrobě.

32C45

Pro vzorek označený 32C45 byl zvýšen výkon, zvýšena řezná rychlost, zvýšena frekvence a duty.

3VC45

Vzorek vyrobený za parametrů označených v tabulce 3VC45 byl vyroben pomocí vzduchu, jako řezného plynu. Pro vzduch musela být snížena řezná rychlost a zvýšen tlak plynu.

B) C45_6 mm

Tabulka 15 popisuje parametry, které byly použity pro výrobu vzorků z plechu jakosti C45 tloušťky 6 mm. Z materiálu této jakosti a této tloušťky byly vyrobeny tři vzorky, které byly označeny 61C45, 62C45, 6VC45. Pod tabulkou je popsána volba parametrů

Tabulka 15 Přehled nastavení parametrů pro řezání materiálu C45_6 mm

Material: C45		Thickness: 6 mm				
No.	Feed rate [mm/min]	Power [W]	Freq	Duty [%]	Gas Press [MPa]	Gas kind
61C45	2000	2000	2200	100	6	O
62C45	2500	3000	2200	88	6	O
6VC45	1000	3000	350	90	15	Vzduch

61C45

Vzorek označený 61C45 byl vyroben pomocí doporučených parametrů firmy AMADA. Toto nastavení laseru běžně firma HKD Třebíč používá při výrobě.

62C45

Řezný výkon, řezná rychlost byly zvýšeny při výrobě vzorku označeného 62C45, který prošel výběrovými kritérii.

6VC45

Kyslík byl použit jako řezný plyn pro výrobu vzorku označeného 6VC45.

4.2.4 EN X5CrNi18-10**A) EN X5CrNi18-10_3 mm**

Tabulka 16 znázorňuje zvolené parametry pro výrobu vzorků z materiálu EN X5CrNi18-10 tloušťky 3 mm. Vzorky byly označeny jako 31Ner, 32Ner.

Tabulka 16 Přehled nastavení parametrů pro řezání materiálu EN X5CrNi18-10_3 mm

Material: X5CrNi18-10		Thickness: 3 mm				
No.	Feed rate [mm/min]	Power [W]	Freq	Duty [%]	Gas Press [MPa]	Gas kind
31Ner	2000	2500	1500	77	10	N
32Ner	2200	3000	2200	88	11	N

31Ner

Parametry použité pro vzorek 31Ner jsou opět doporučené parametry firmou AMADA. Tyto parametry jsou běžně používány ve výrobě firmy HKD Třebíč. Zajímavostí oproti předchozím materiálům je to, že pro nerez je jako řezný plyn použit dusík.

32Ner

Vzorek označený 32Ner prošel jako další vstupním výběrovým kritériem. Parametry laseru byly oproti doporučeným od firmy AMADA upraveny následovně, výkon, řezná rychlost a frekvence byly zvýšeny, stejně i tlak plynu.

B) EN X5CrNi18-10_6 mm

V tabulce 17 jsou uvedeny parametry laserového řezání, které byly použity pro výrobu vzorků z materiálu EN X5CrNi18-10 tloušťky 6 mm. Výběrovým kritériem prošly dva vzorky označené jako 61Ner a 62 Ner.

Tabulka 17 Přehled nastavení parametrů pro řezání materiálu EN X5CrNi18-10_6 mm

Material: X5CrNi18-10 Thickness: 6 mm						
No.	Feed rate [mm/min]	Power [W]	Freq	Duty [%]	Gas Press [MPa]	Gas kind
61Ner	700	3000	2200	88	12	N
62Ner	1000	2500	2200	88	11	N

61Ner

Vzorek označený 61Ner byl vyroben standardně používanými parametry laserového stroje, tedy parametry doporučenými firmou AMADA.

61Ner

Vzorek označený 32Ner prošel jako další vstupním výběrovým kritériem. Parametry laseru byly oproti doporučeným od firmy AMADA upraveny následovně, výkon, řezná rychlost a frekvence byly zvýšeny, stejně i tlak plynu.

4.2.5 Hliníková slitina AlMg3

A) AlMg3_3mm

V tabulce 18 jsou uvedeny parametry laserového řezání, které byly použity pro výrobu vzorků z materiálu AlMg3 tloušťky 3 mm. Výběrovým kritériem prošly dva vzorky označené jako 31Al a 32Al.

Tabulka 18 Přehled nastavení parametrů pro řezání materiálu AlMg3_3 mm

Material: AlMg3 Thickness: 3 mm						
No.	Feed rate [mm/min]	Power [W]	Freq	Duty [%]	Gas Press [MPa]	Gas kind
31Al	2000	2500	2000	80	10	N
32Al	2500	3000	2000	80	12	N

B) AlMg3_6mm

V tabulce 19 jsou uvedeny parametry laserového řezání, které byly použity pro výrobu vzorků z materiálu AlMg3 tloušťky 6 mm. Výběrovým kritériem prošly dva vzorky označené jako 61Al a 62Al.

Tabulka 19 Přehled nastavení parametrů pro řezání materiálu AlMg3_6 mm

Material: AlMg3 Thickness: 6 mm						
No.	Feed rate [mm/min]	Power [W]	Freq	Duty [%]	Gas Press [MPa]	Gas kind
61Al	800	2500	2200	88	11	N
62Al	1000	3000	2200	88	13	N

5 TESTOVÁNÍ VZORKŮ

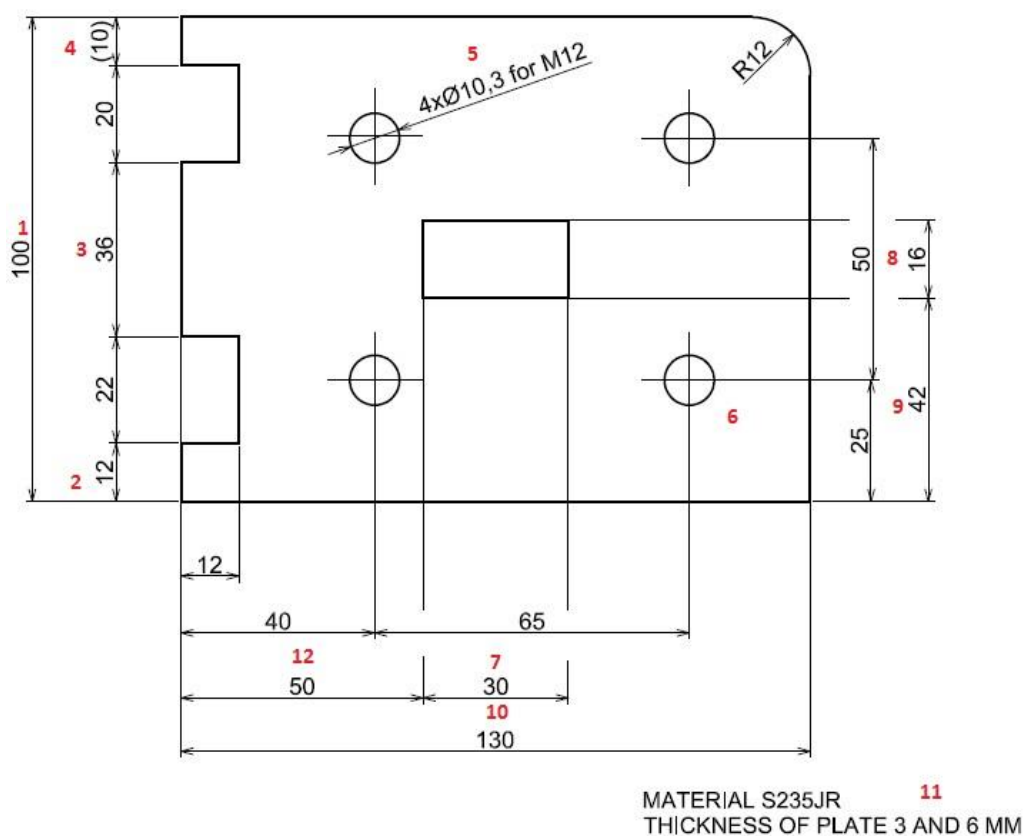
V této kapitole je popsáno měření vzorků vyrobených při experimentu. U každého vzorku byly změřeny následující vlastnosti:

- rozměrová přesnost
- tvrdost
- drsnost
- velikost otřepů a optická kontrola

Měření bylo provedeno v laboratořích firmy HKD Třebíč a firmy Mann-Hummel.

5.1 Rozměrová přesnost

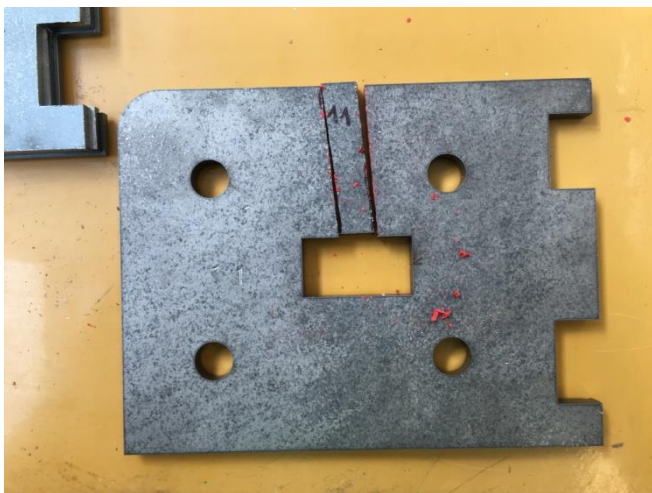
První částí experimentu bylo zkoumání rozměrové přesnosti výpalků. Rozměrová přesnost byla měřena za pomoci digitálního třmenového mikrometru, mikrometr je znázorněn na obrázku 25 a za pomoci digitálního posuvného měřítka. Vyhodnocení přesnosti probíhalo změřením vybraných jedenácti různých rozměrů. Měřené rozměry jsou znázorněny na obrázku 25. Každý rozměr byl měřen celkem třikrát. Z těchto tří rozměrů se vyhodnotila střední hodnota, která je zapsána v tabulce pro každý vzorek.



Obrázek 23 Měřené pozice na vzorku

5.2 Tvrdost

Jako další experimentálně měřená veličina byla měřena tvrdost. Z každého vypáleného vzorku byl odebrán metalografický vzorek za pomoci ruční pily. Detail metalografického vzorku je znázorněn na obrázku 27. Každý vzorek byl zalit zalévací hmotou za studena do formy a byl řádně označen svým výrobním číslem. Po vytvrdnutí hmoty byly vzorky vybroušeny na metalografickém zařízení Streurs, toto zařízení je znázorněno na obrázku 28. Celý tento proces, stejně jako samotné měření tvrdosti probíhalo v laboratoři firmy Mann-Hummel.



Obrázek 24 Odběr materiálu pro metalografii



Obrázek 25 Metalografický vzorek

Pro měření tvrdosti byl použit tester Matsuzawa Seiko MHT-1. Měření všech metalografických vzorků probíhalo v následujících krocích:

- nastavení pracovního zatížení testeru na 300 gramů
- nastavení doby zatížení na 15 sekund
- ustavení vzorku
- provedení vrypu jehlanu do vzorku ve vzdálenosti 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,7 a 0,9 mm a to ve dvou řadách
- změření dvou úhlopříček jehlanu
- vyhodnocení tvrdosti dle Table for Vickers hardness number



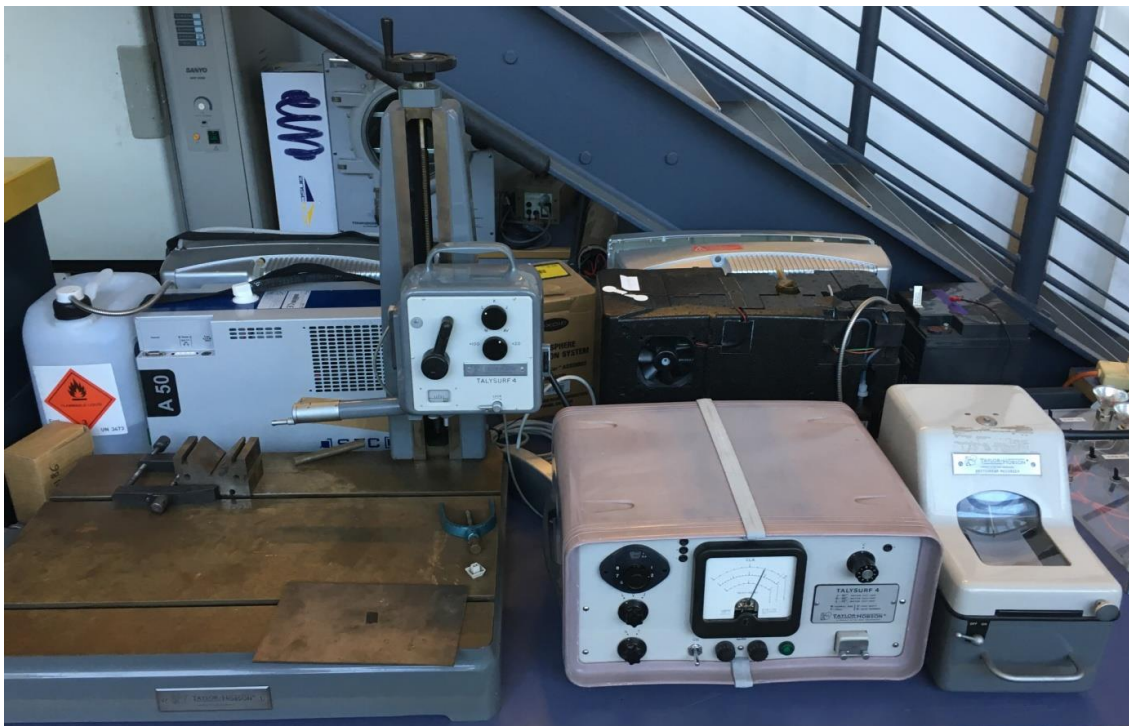
Obrázek 26 Zařízení Streurs pro výbrus



Obrázek 27 Tester pro měření tvrdost

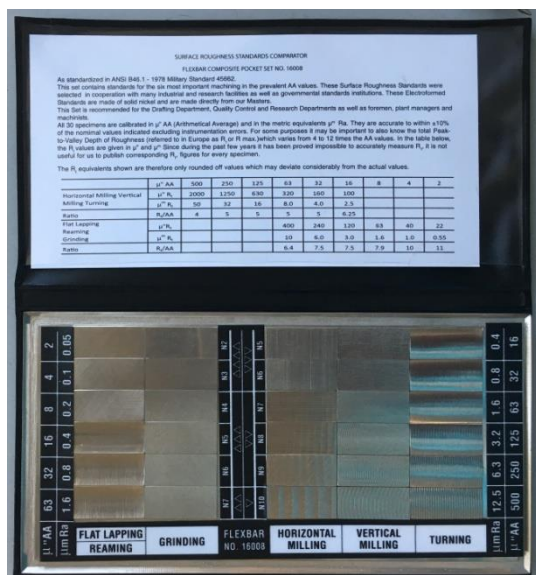
5.3 Drsnost

Jedním z nejdůležitějších parametrů, který určuje kvalitu řezu, je drsnost povrchu řezné plochy. Drsnost řezných ploch byla měřena dotykovým digitálním drsnoměrem Talysurf 4 v laboratořích firmy HKD Třebíč. Před měřením byla v drsnoměru zvolena jako základní vyhodnocovaná délka $l_r = 0,8$ mm a vyhodnocovaná délka $l_n = 4$ mm. Nájezdy a přejezdy si volí měřicí přístroj automaticky. Přístroj Talysurf 4 je zobrazen na obrázku 31.

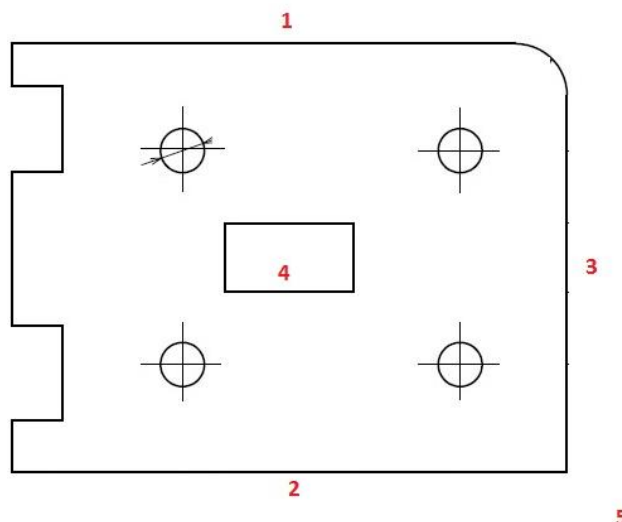


Obrázek 28 Drsnoměr Talysurf

Měření drsnosti na každém vzorku bylo provedeno na čtyřech plochách, páté měření bylo provedeno pomocí porovnávací šablony. Vybrané plochy jsou vyobrazeny čísly na obrázku 30. Měření se provádělo na tři opakování, výsledná střední hodnota drsnosti je pro každý vzorek zobrazena v tabulce v další kapitole.



Obrázek 29 Šablona pro měření drsnosti



Obrázek 30 Plochy pro měření drsnosti

5.4 Velikost otřepů a optická kontrola řezné hrany

Vzhledem k nedostatku času byly otřepy ověřovány optickou metodou studentem. Tudiž makrofotografie vzorků nebyly pořízeny.

Student použil pro vyhodnocení velikosti otřepů svůj zrak a svůj hmat. A vzorky byly na základě zrakového a hmatového pocitu ohodnoceny stupnicí následovně:

1. Viditelně velký otřep; otřep hmatem velmi převyšuje řeznou hranu
2. Otřep je viditelný; otřep hmatem převyšuje řeznou hranu
3. Otřep je nepatrně viditelný; hmatem velmi nepatrný přes řeznou hranu
4. Bez viditelného otřepu; na řezné hraně není hmatem otřep k rozeznání

6 VYHODNOCENÍ NASTAVENÝCH PARAMETRŮ Z HLEDISKA PRODUKTIVITY PRÁCE A KVALITY ŘEZU

V kapitole vyhodnocení nastavených parametrů z hlediska produktivity práce a kvality řezu jsou rozebrány výsledky provedené v experimentu, tedy:

- Rozměrová přesnost,
- Tvrdost,
- Drsnost,
- Velikost otřepů a optická kontrola řezné hrany.

Porovnání proběhne zvláště pro všechny použité materiály v experimentu:

- DC01
- S235JR
- C45
- EN X5CrNi18-10

A u každého z materiálu zvláště pro tloušťku 3 mm a tloušťku 6 mm. V následujících podkapitolách jsou zaznamenány výsledky všech zmíněných měření v tabulkách. Výsledky jsou graficky znázorněny a popsány.

6.1 Rozměrová přesnost

Rozměrová přesnost je jeden z nejdůležitějších parametrů, který ukazuje kvalitu řezu. Dodržet správné rozměry dle předepsaných souřadnic výkresu by mělo být základní funkcí laserového stoje.

6.1.1 DC01

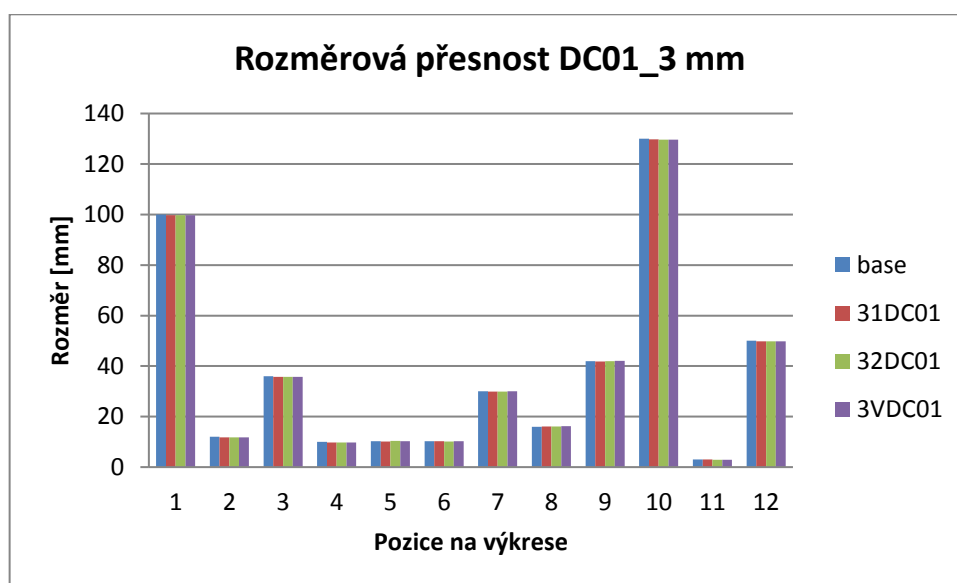
A) DC01_3 mm

Tabulka 20 znázorňuje výsledky přesnosti vzorků vyrobených z materiálu DC01 tloušťky plechu 3 mm. V prvním řádku tabulky jsou hodnoty dle výkresu vzorku. Další řádky ukazují rozměrové výsledky jednotlivých materiálů.

Tabulka 20 Výsledky měření rozměrů vzorků z DC01_3 mm

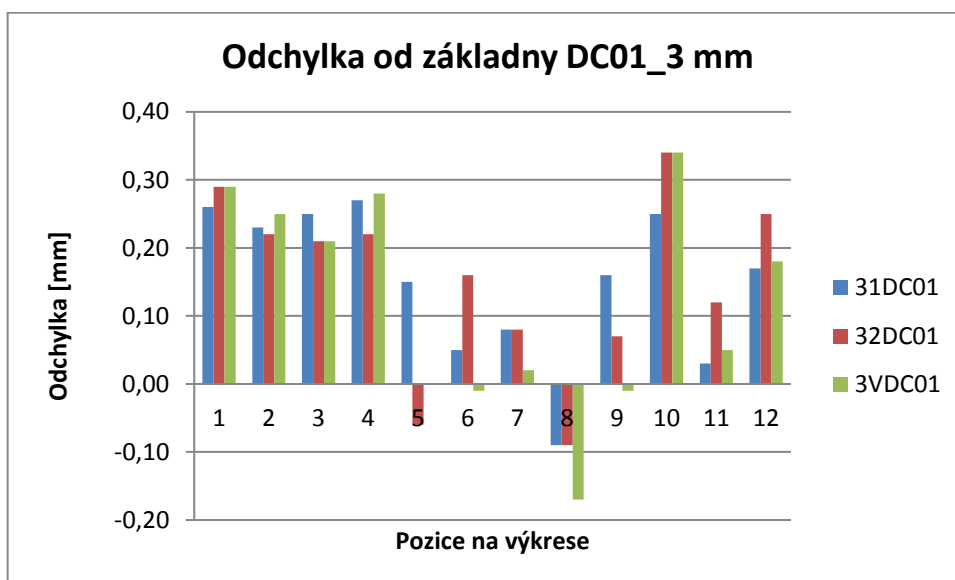
Pozice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Base	100	12	36	10	10,3	10,3	30	16	42	130	3	50
31DC01	99,74	11,77	35,75	9,73	10,15	10,25	29,92	16,09	41,84	129,75	2,97	49,83
32DC01	99,71	11,78	35,79	9,78	10,36	10,14	29,92	16,09	41,93	129,66	2,88	49,75
3VDC01	99,71	11,75	35,79	9,72	10,3	10,31	29,98	16,17	42,01	129,66	2,95	49,82

Pro znázornění výsledků přesnosti byl použit graf 1, který znázorňuje výsledky měření jednotlivých pozic na výkrese. Bohužel rozdíly jednotlivých vzorků jsou velmi nepatrné a kvůli měřítku grafu je těžké je rozpoznat. Proto byl vytvořen graf XX, který znázorňuje odchylku jednotlivého změřeného rozměru od základní kóty zadané na výkrese.



Graf 1 Rozměrová přesnost DC01_3 mm

Z grafu 2 lze vyčíst, že nejhorší rozměrovou přesnost má vzorek označený 3VDC01. A naopak nejlepší rozměry má vzorek vyrobený dle parametrů označených 32DC01.



Graf 2 Odchylka od základny DC01_3 mm

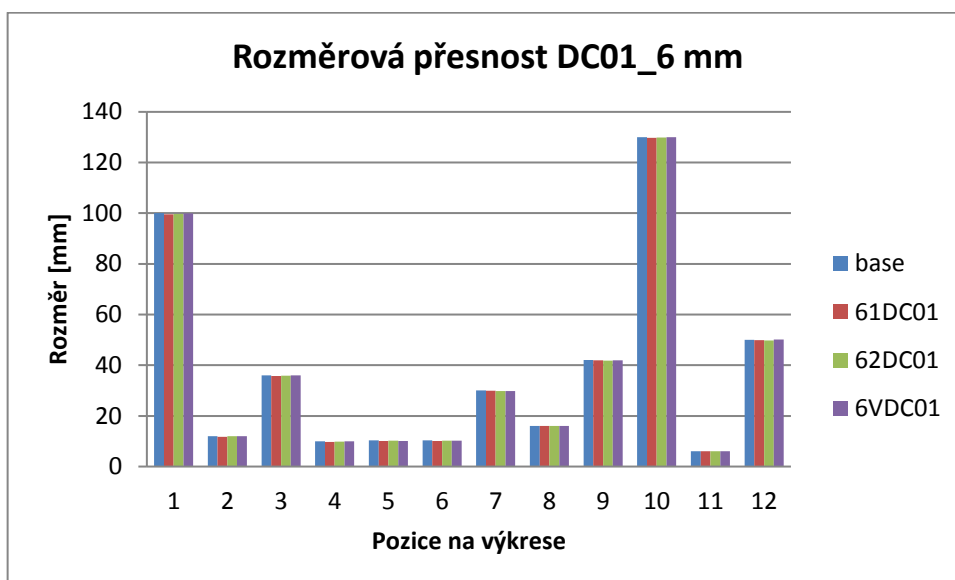
B) DC01_6 mm

Tabulka 21 znázorňuje výsledky přesnosti vzorků vyrobených z materiálu DC01 tloušťky plechu 6 mm.

Tabulka 21 Výsledky měření rozměrů vzorků z DC01_6 mm

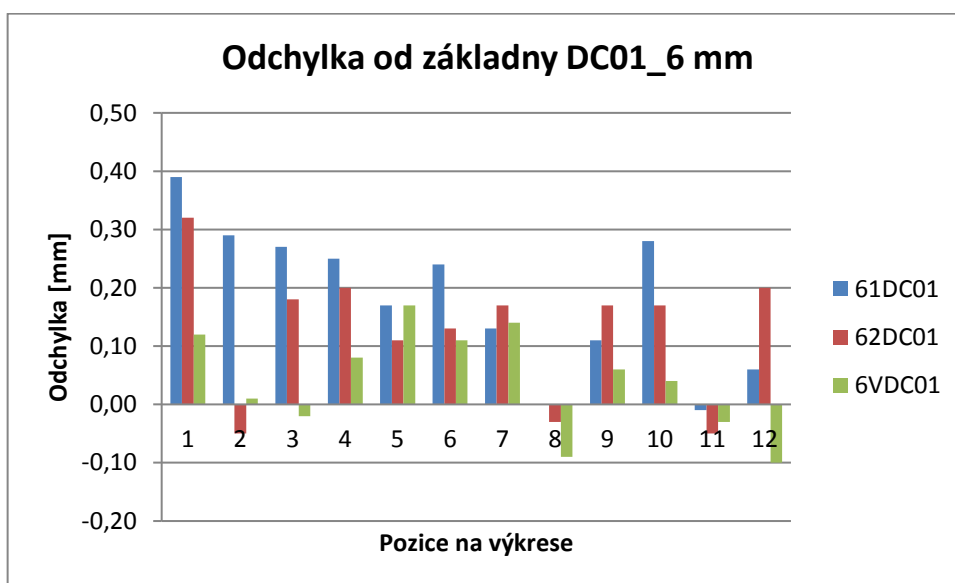
Pozice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Base	100	12	36	10	10,3	10,3	30	16	42	130	3	50
61DC01	99,61	11,71	35,73	9,75	10,13	10,06	29,87	16	41,89	129,72	6,01	49,94
62DC01	99,68	12,05	35,82	9,8	10,19	10,17	29,83	16,03	41,83	129,83	6,05	49,8
6VC01	99,88	11,99	36,02	9,92	10,13	10,19	29,86	16,09	41,94	129,96	6,03	50,1

Graf 3 znázorňuje rozměrovou přesnost vzorků vyrobených z materiálu DC01 tloušťky 6 mm. Pro lepší pochopení výsledků byl sestaven graf 4, který popisuje rozměrovou odchylku dvanácti měřených rozměrů od předepsaných rozměrů na výkrese.



Graf 3 Rozměrová přesnost DC01_6 mm

Z Grafu 4 a z hodnot v tabulce 21 je možné vyčíst, že vzorek vypálený dle parametrů laserového stroje označený jako 61DC01 je dle odchyly nejvíce nepřesný. Naopak vzorek značený jako 6VDC01 je nej přesnější.



Graf 4 Odchylka od základny DC01_6 mm

6.1.2 S235JR

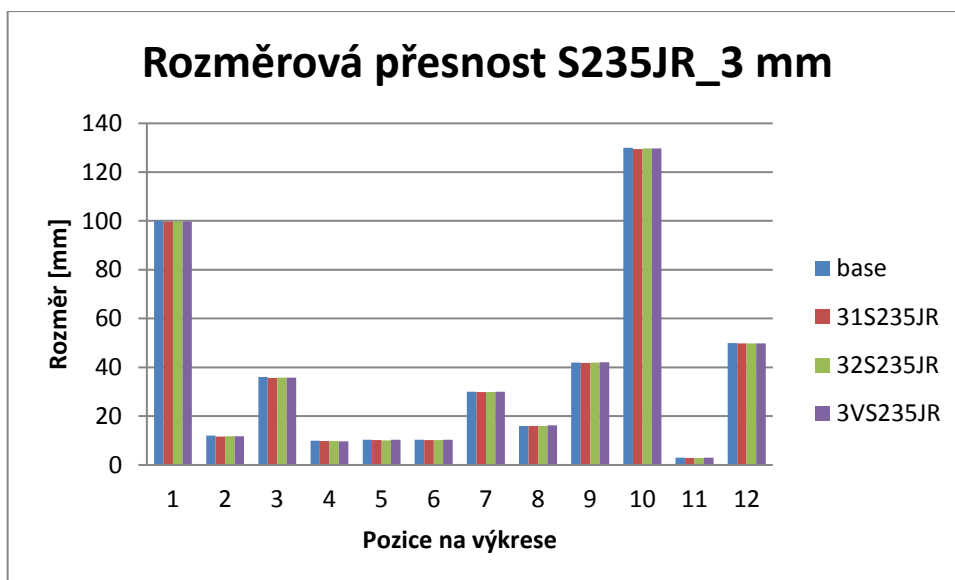
A) S235JR_3 mm

Tabulka 22 znázorňuje výsledky přesnosti vzorků vyrobených z materiálu S235JR tloušťky plechu 3 mm.

Tabulka 22 Výsledky měření rozměrů vzorků z S235JR_3 mm

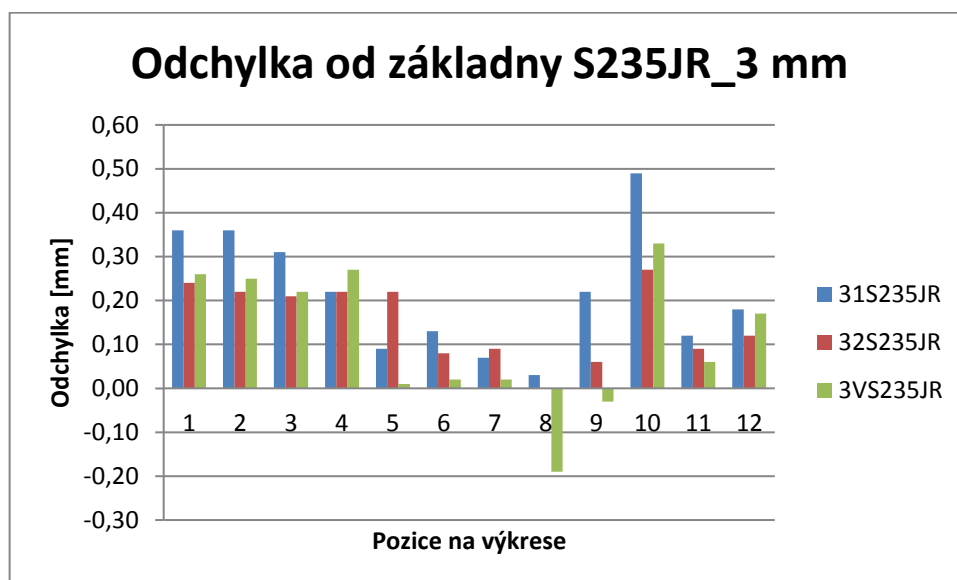
Pozice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Base	100	12	36	10	10,3	10,3	30	16	42	130	3	50
31S235JR	99,64	11,64	35,69	9,78	10,21	10,17	29,93	15,97	41,78	129,51	2,88	49,82
32S235JR	99,76	11,78	35,79	9,78	10,08	10,22	29,91	16	41,94	129,73	2,91	49,88
3VS235JR	99,74	11,75	35,78	9,73	10,29	10,28	29,98	16,19	42,03	129,67	2,94	49,83

Graf 5 znázorňuje rozměrovou přesnost vzorků vyrobených z materiálu S235JR tloušťky 3 mm. Pro lepší pochopení výsledků byl sestaven graf 6, který popisuje rozměrovou odchylku dvanácti měřených rozměrů od předepsaných rozměrů na výkrese.



Graf 5 Rozměrová přesnost S235JR_3 mm

Dle grafu 6 a tabulky 22 s výsledky je možné zjistit, že pro materiál S235JR tloušťky 3 mm byl nejpresněji vypálen vzorek označen jako 32S235JR. Naopak nejméně přesný vzorek je vzorek vypálený dle parametrů označených jako 31S235JR.



Graf 6 Odchylka od základny S235JR_3 mm

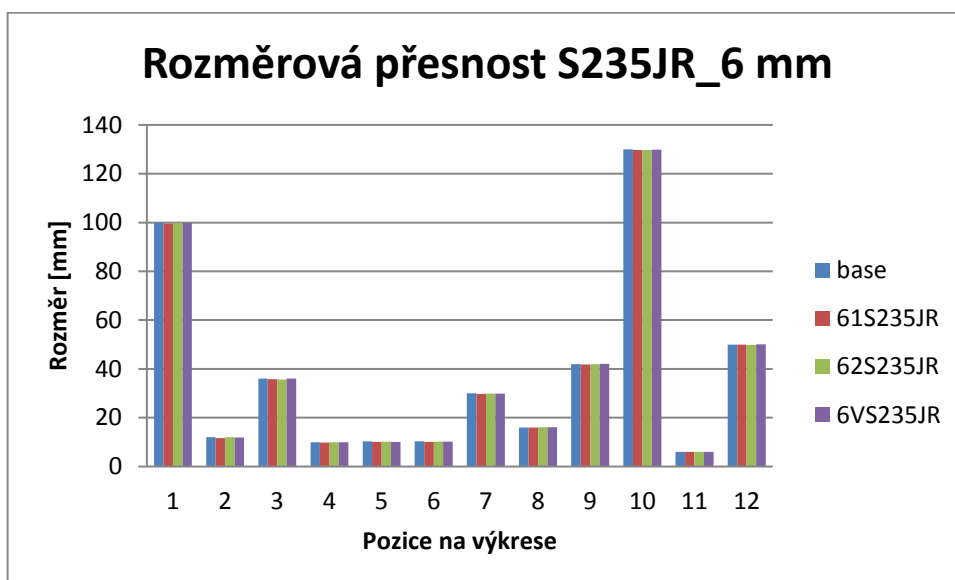
B) S235JR_6 mm

Tabulka 23 znázorňuje výsledky přesnosti vzorků vyrobených z materiálu S235JR tloušťky plechu 6 mm.

Tabulka 23 Výsledky měření rozměrů vzorků z S235JR_6 mm

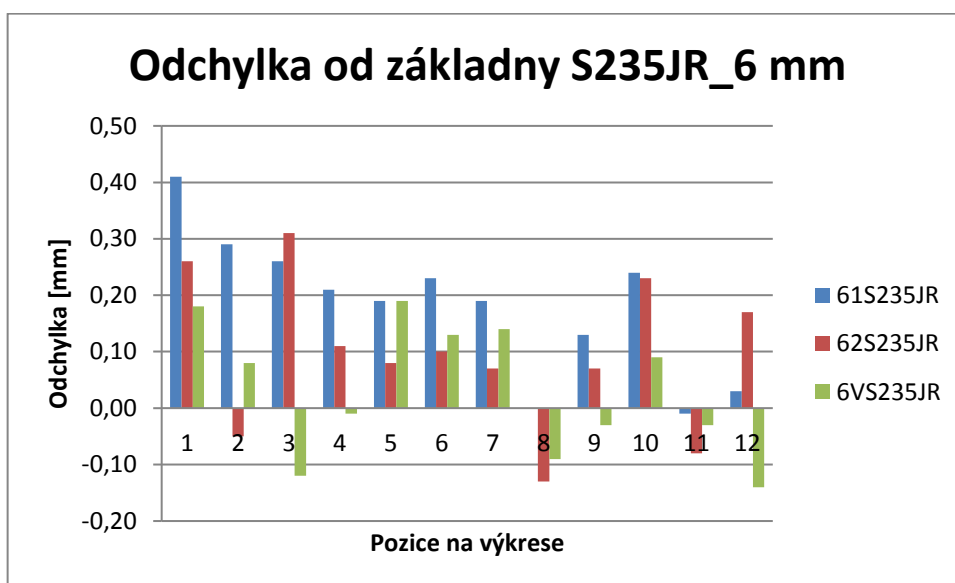
Pozice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Base	100	12	36	10	10,3	10,3	30	16	42	130	3	50
61S235JR	99,59	11,71	35,74	9,79	10,11	10,07	29,81	16	41,87	129,76	6,01	49,97
62S235JR	99,74	12,05	35,69	9,89	10,22	10,2	29,93	16,13	41,93	129,77	6,08	49,83
6VS235JR	99,82	11,92	36,12	10,01	10,11	10,17	29,86	16,09	42,03	129,91	6,03	50,14

Graf 7 znázorňuje rozměrovou přesnost vzorků vyrobených z materiálu S235JR tloušťky 6 mm. Pro lepší znázornění výsledků byl sestaven graf 8, který vyjadřuje rozměrovou odchylku dvanácti měřených rozměrů od předepsaných rozměrů na výkrese.



Graf 7 Rozměrová přesnost S235JR_6 mm

Pro materiál S235JR tloušťky plechu 6 mm je dle rozměrové přesnosti nejvhodnější zvolit parametry 6VS235JR. Naopak nejhorší parametry jsou dle vzorku označeného jako 61S235JR.



Graf 8 Odchylka od základny S235JR_6 mm

6.1.3 C45

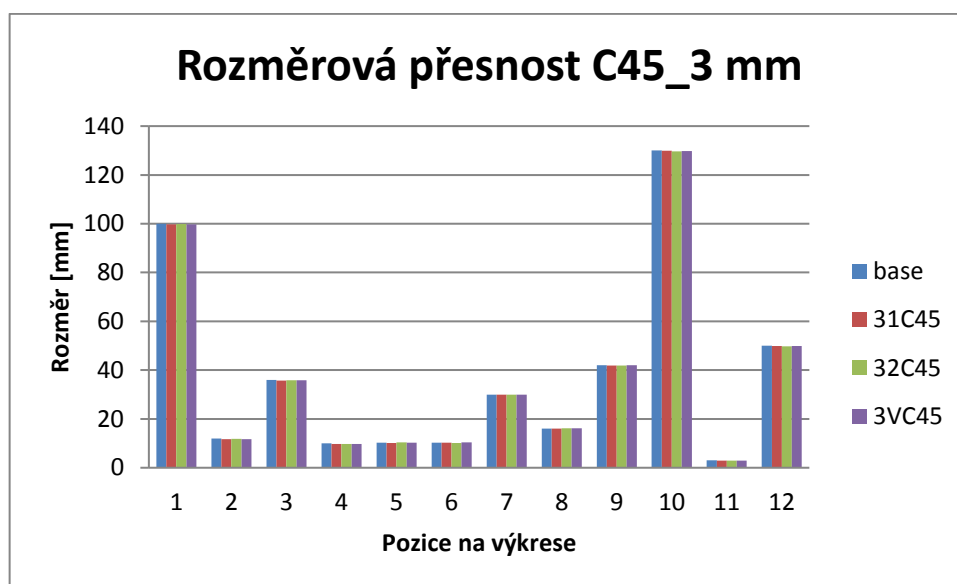
A) C45_3 mm

Tabulka 24 znázorňuje výsledky přesnosti vzorků vyrobených z materiálu C45 tloušťky plechu 3 mm.

Tabulka 24 Výsledky měření rozměrů vzorků z C45_3 mm

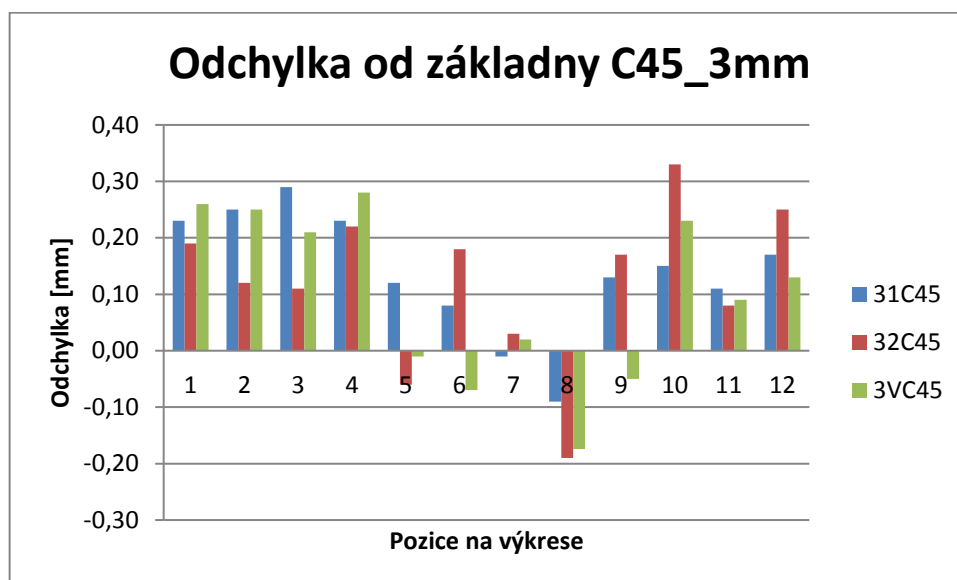
Pozice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Base	100	12	36	10	10,3	10,3	30	16	42	130	3	50
31C45	99,77	11,75	35,71	9,77	10,18	10,22	30,01	16,09	41,87	129,85	2,89	49,83
32C45	99,81	11,88	35,89	9,78	10,36	10,12	29,97	16,19	41,83	129,67	2,92	49,75
3VC45	99,74	11,75	35,79	9,72	10,31	10,37	29,98	16,174	42,05	129,77	2,91	49,87

Graf 9 znázorňuje rozměrovou přesnost vzorků vyrobených z materiálu C45 tloušťky 3 mm. Hodnoty do grafu jsou změřené výsledky vzorků, které byly zapsány do tabulky 2.



Graf 9 Rozměrová přesnost C45_3 mm

Pro lepší zjištění výsledků rozměrové přesnosti byl sestaven graf 10, který znázorňuje odchylku rozměrů vzorků od požadovaných rozměrů dle výkresu. Z tohoto grafu je možné zjistit, že pro plech z materiálu C45 tloušťky 3 mm není jasné, který výpalek je nejpřesnější. Každý z výpalků má výraznou odchylku v jiném rozměru, tudíž nelze přesně označit nejlépe přesný vzorek.



Graf 10 Odchylka od základny C45_3mm

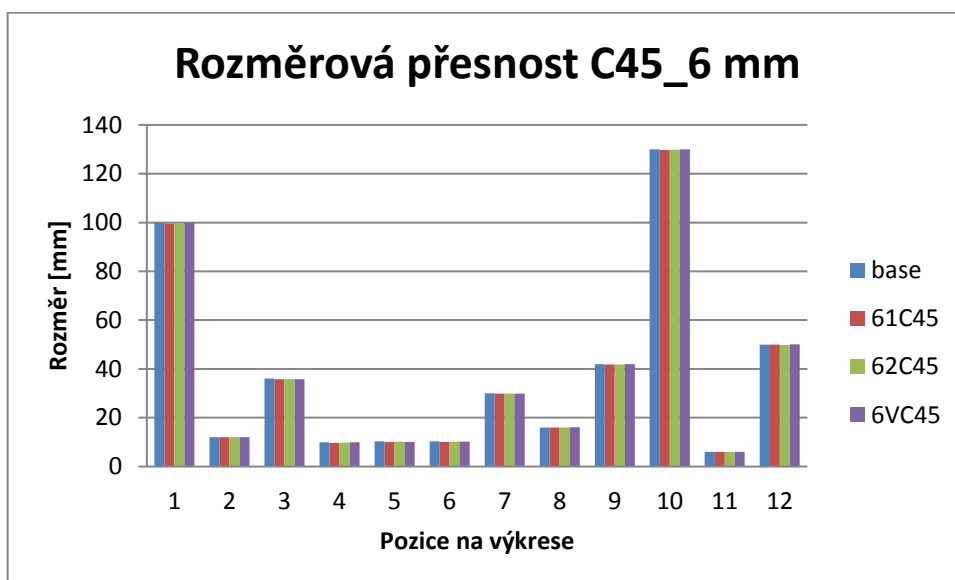
B) C45_6 mm

Tabulka 25 znázorňuje výsledky přesnosti vzorků vyrobených z materiálu C45 tloušťky plechu 6 mm.

Tabulka 25 Výsledky měření rozměrů vzorků z C45_6 mm

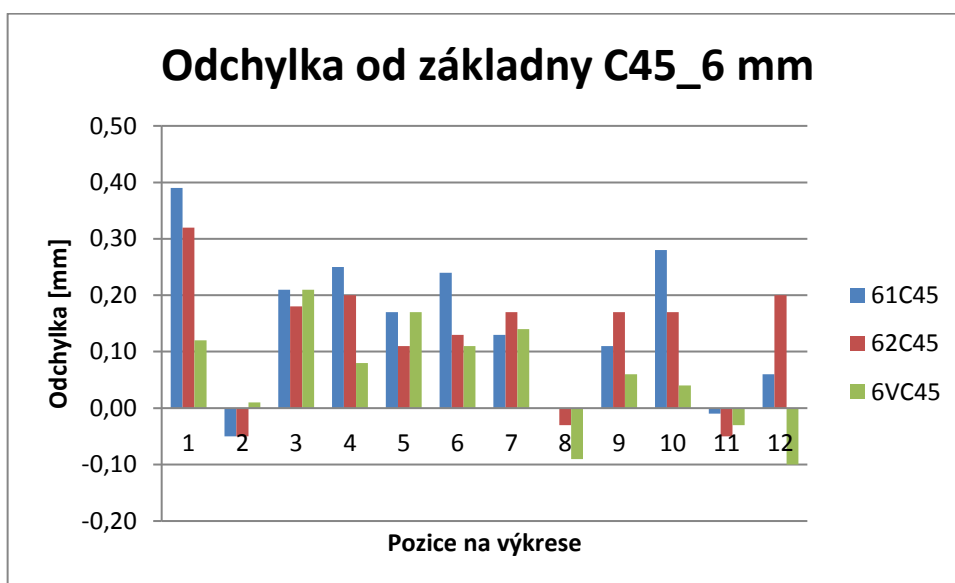
Pozice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Base	100	12	36	10	10,3	10,3	30	16	42	130	3	50
61C45	99,61	12,05	35,79	9,75	10,13	10,06	29,87	16	41,89	129,72	6,01	49,94
62C45	99,68	12,05	35,82	9,8	10,19	10,17	29,83	16,03	41,83	129,83	6,05	49,8
6VC45	99,88	11,99	35,79	9,92	10,13	10,19	29,86	16,09	41,94	129,96	6,03	50,1

Graf 11 graficky ukazuje výsledky měření zapsaných v tabulce 25. Pro lepší čtení výsledků byl sestaven také graf 12, který znázorňuje rozměrové odchylky vzorků od výkresu.



Graf 11 Rozměrová přesnost C45_6 mm

Z grafu 12 a z tabulky výsledků měření vyplívá, že nejpřesnější vzorek z materiálu C45 tloušťky 6 mm je označen jako 6VC45. Naopak nejhorší přesnost má vzorek značený jako 61C45.



Graf 12 Odchylka od základny C45_6 mm

6.1.4 EN X5CrNi18-10

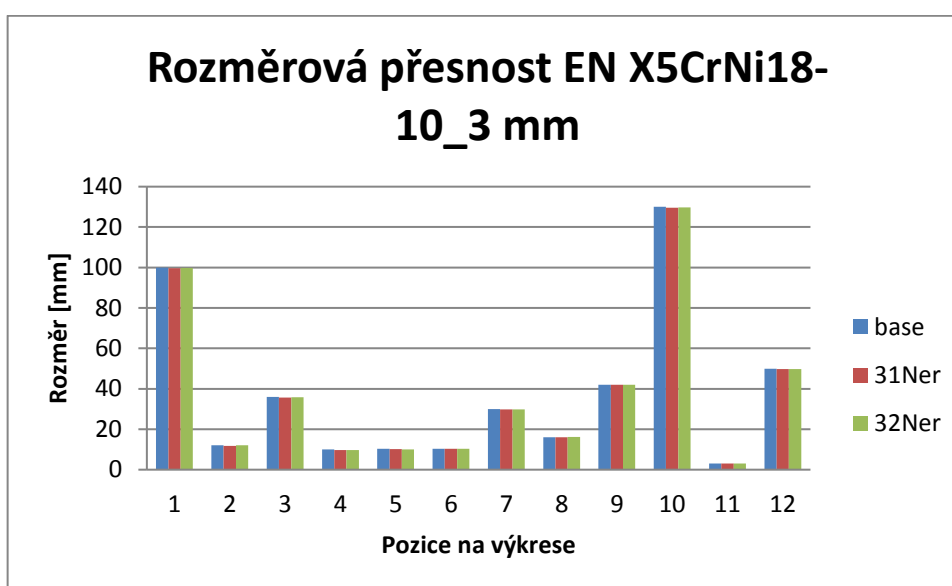
A) EN X5CrNi18-10_3 mm

Tabulka 26 znázorňuje výsledky přesnosti vzorků vyrobených z materiálu EN X5CrNi18-10 tloušťky plechu 3 mm.

Tabulka 26 Výsledky měření rozměrů vzorků z EN X5CrNi18-10_3 mm

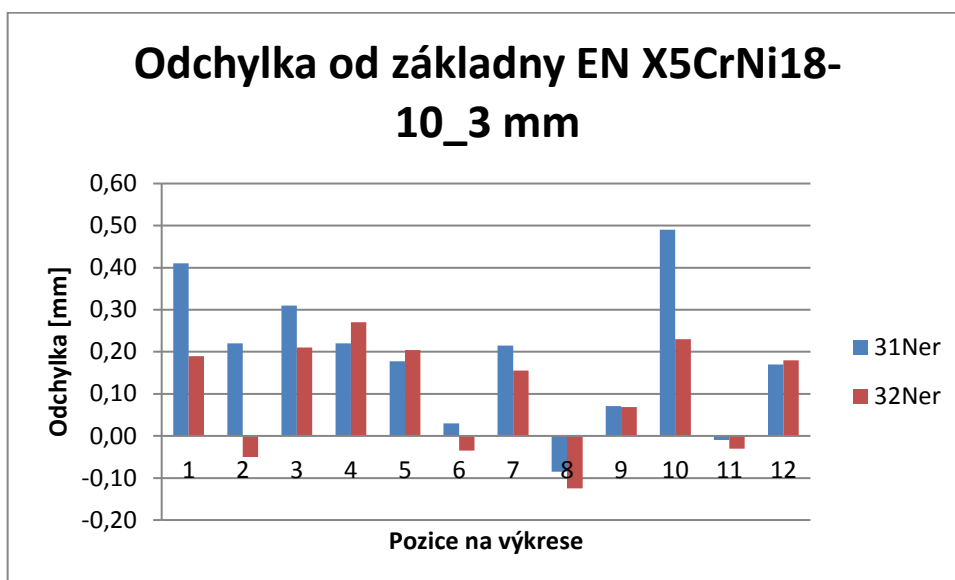
Pozice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Base	100	12	36	10	10,3	10,3	30	16	42	130	3	50
31Ner	99,59	11,78	35,69	9,78	10,12	10,27	29,79	16,09	41,93	129,51	3,01	49,83
32Ner	99,81	12,05	35,79	9,73	10,10	10,34	29,85	16,12	41,93	129,77	3,03	49,82

Výsledky z tabulky 26 jsou graficky zpracovány v grafu 13. Graf 14 také vychází z výsledku měření zapsaných v tabulce, znázorňuje totiž odchylku měření oproti výkresové specifikaci.



Graf 13 Rozměrová přesnost EN X5CrNi18-10_3 mm

Z grafu 14 je patrné, že výpalek označený jako 32 Ner je přesnější než výpalek 31 Ner.



Graf 14 Odchylka od základny EN X5CrNi18-10_3 mm

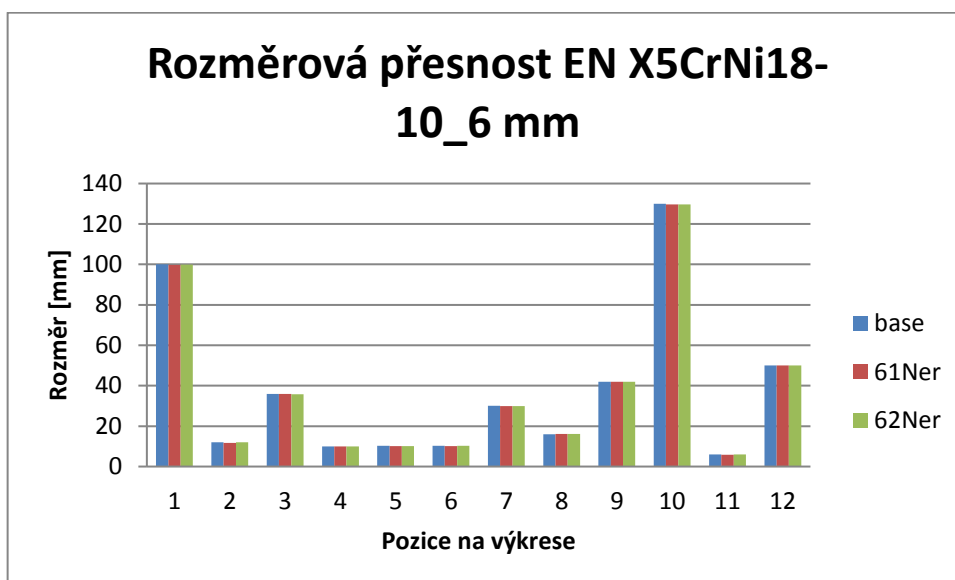
B) EN X5CrNi18-10_6 mm

Tabulka 27 znázorňuje výsledky přesnosti vzorků vyrobených z materiálu EN X5CrNi18-10 tloušťky plechu 6 mm.

Tabulka 27 Výsledky měření rozměrů vzorků z EN X5CrNi18-10_6 mm

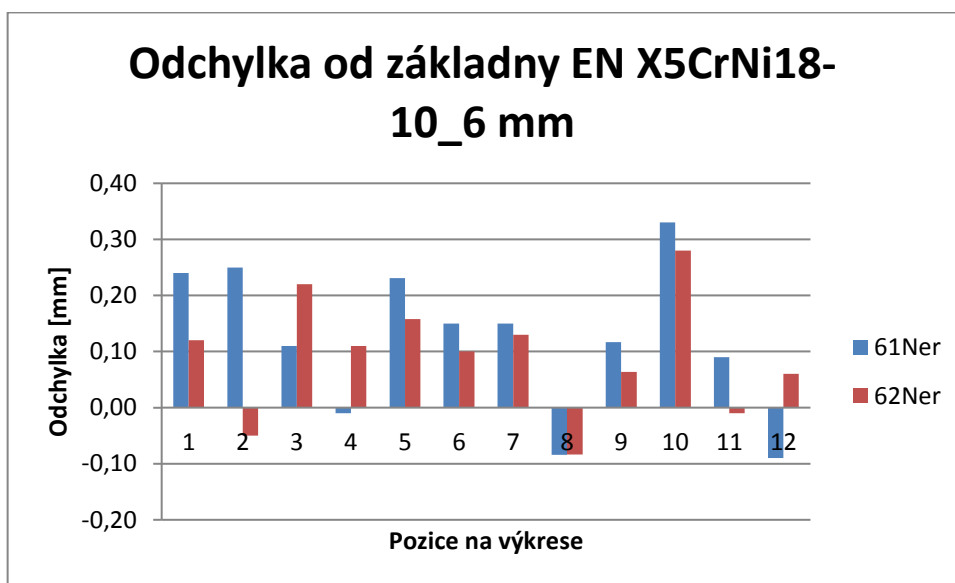
Pozice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Base	100	12	36	10	10,3	10,3	30	16	42	130	3	50
61Ner	99,76	11,75	35,89	10,01	10,07	10,15	29,85	16,08	41,88	129,67	5,91	50,09
62Ner	99,88	12,05	35,78	9,89	10,14	10,20	29,87	16,08	41,94	129,72	6,01	49,94

Výsledky měření vzorků z plechu jakosti X5CrNi18-10 tloušťky 6 mm jsou graficky vyhodnocené v grafu 15. Aby bylo lépe výrazné, jak který vzorek je přesný, byl také sestrojen graf 16, který ukazuje rozměrové odchylky výpalků od specifikací.



Graf 15 Rozměrová přesnost EN X5CrNi18-10_6 mm

Dle grafu 16 lze nepatrně vyčíst, že vzorek značený jako 62Ner je mírně přesnější než vzorek 61Ner.



Graf 16 Odchylka od základny EN X5CrNi18-10_6 mm

6.1.5 Hliníková slitina AlMg3

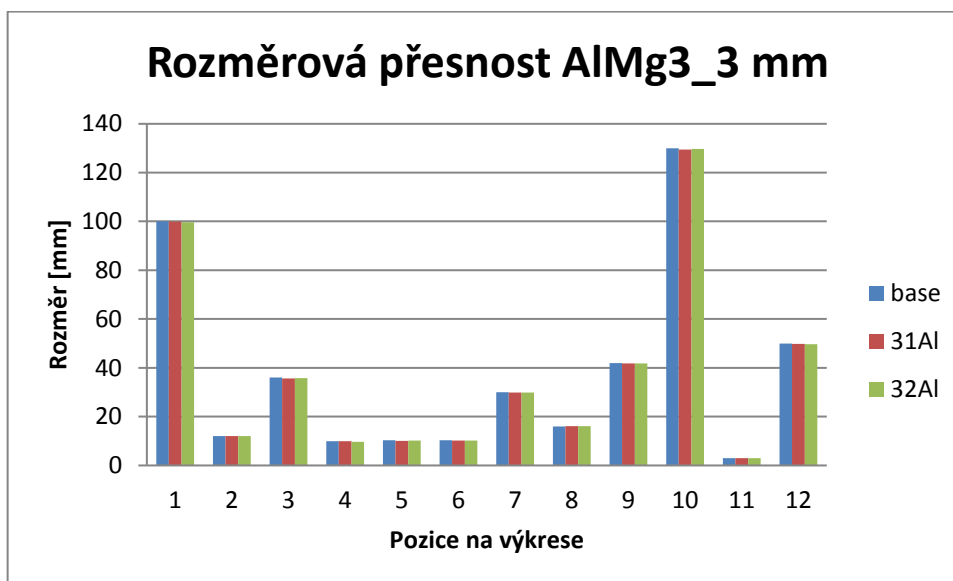
A) AlMg3_3 mm

Tabulka 28 znázorňuje výsledky přesnosti vzorků vyrobených z materiálu EN AlMg3 tloušťky plechu 3 mm.

Tabulka 28 Výsledky měření rozměrů vzorků z AlMg3_3 mm

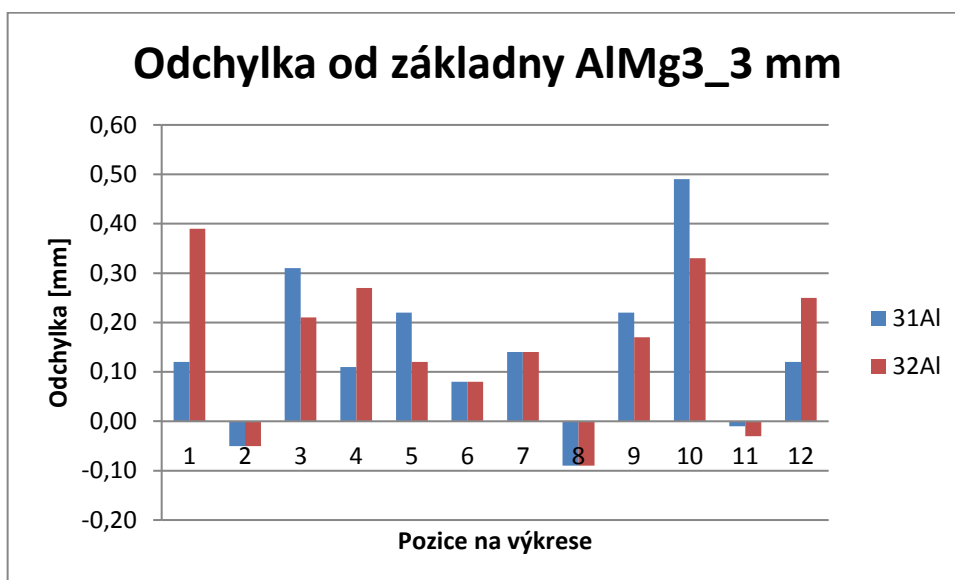
Pozice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Base	100	12	36	10	10,3	10,3	30	16	42	130	3	50
31Al	99,88	12,05	35,69	9,89	10,08	10,22	29,86	16,09	41,78	129,51	3,01	49,88
32Al	99,61	12,05	35,79	9,73	10,18	10,22	29,86	16,09	41,83	129,67	3,03	49,75

Graficky jsou výsledky rozměrové přesnosti znázorněny v grafech 17 a 18. Přesněji graf 18 znázorňuje rozměrové odchylky vzorků od výkresových požadavků.



Graf 17 Rozměrová přesnost AlMg3_3 mm

Dle rozměrových odchylek a rozměrů z tabulky s výsledky je těžké říci, který vypálený vzorek je rozměrově přesnější. Oba mají odchylky na jiných rozměrech. Závěr hodnocení je tedy ten, že vzorky jsou podobně přesné.



Graf 18 Odchylka od základny AlMg3_3 mm

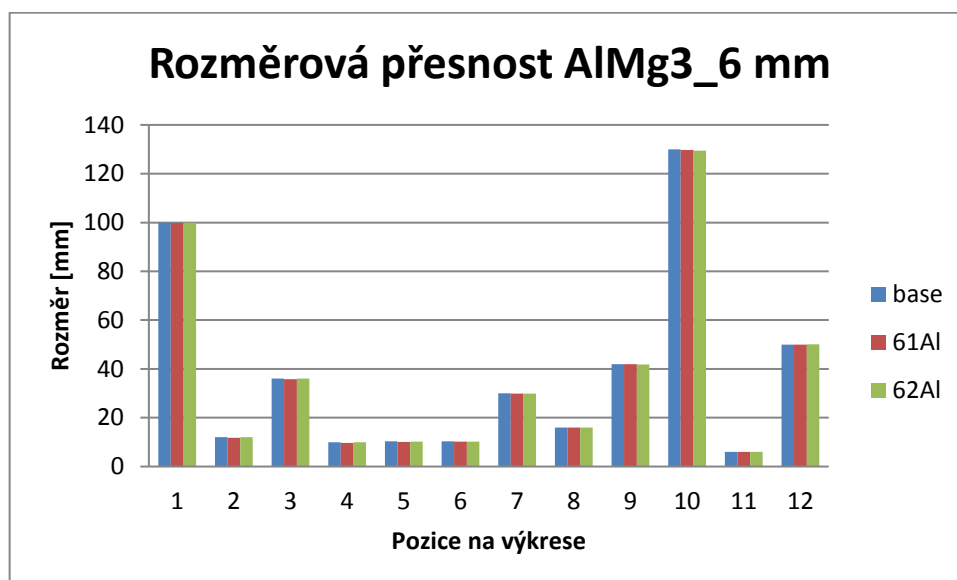
B) AlMg3_6 mm

Tabulka 29 znázorňuje výsledky přesnosti vzorků vyrobených z materiálu EN AlMg3 tloušťky plechu 6 mm.

Tabulka 29 Výsledky měření rozměrů vzorků z AlMg3_6 mm

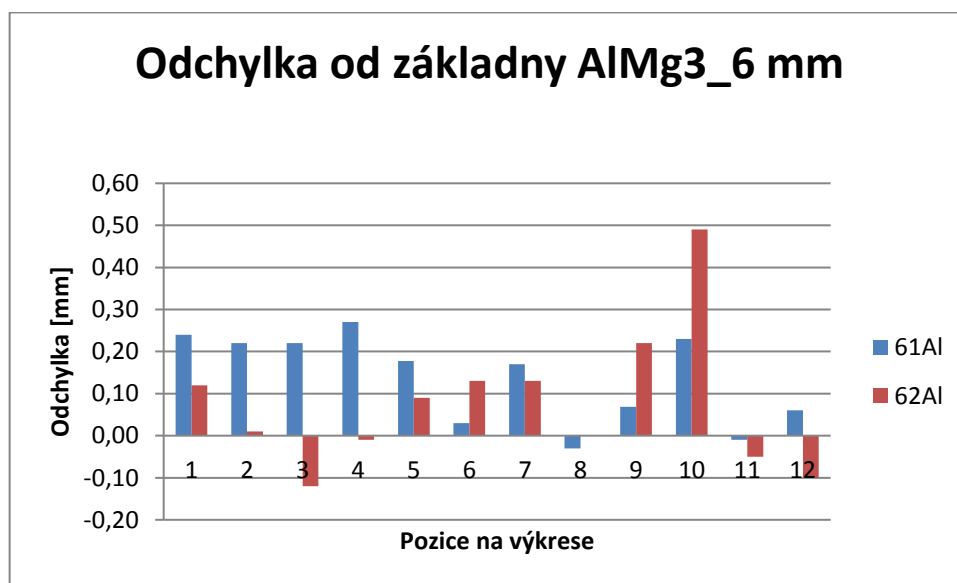
Pozice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Base	100	12	36	10	10,3	10,3	30	16	42	130	3	50
61Al	99,76	11,78	35,78	9,73	10,12	10,27	29,83	16,03	41,93	129,77	6,01	49,94
62Al	99,88	11,99	36,12	10,01	10,21	10,17	29,87	16	41,78	129,51	6,05	50,1

Vyhodnocení rozměrové přesnosti vzorků proběhlo na základě výsledků v tabulce 29 a na základě grafického znázornění dle grafů 19 a 20.



Graf 19 Rozměrová přesnost AlMg3_6 mm

Graf 20 ukazuje rozměrové odchylky pro vzorky z materiálu AlMg3 tloušťky 6 mm. Jako přesnější výpalek z tohoto materiálu se jeví vzorek značený 62Al.



Graf 20 Odchylka od základny AlMg3_6 mm

6.2 Tvrdost

Tvrdost materiálu po zpracování laserem je další z důležitých faktorů, které mohou ovlivnit volbu nastavení parametrů. Častým faktorem v průmyslu je řezání závitů přímo do díry vypálené na laseru. A právě tvrdost materiálu po pálení má výrazný vliv na opotřebení závitových nástrojů.

6.2.1 DC01

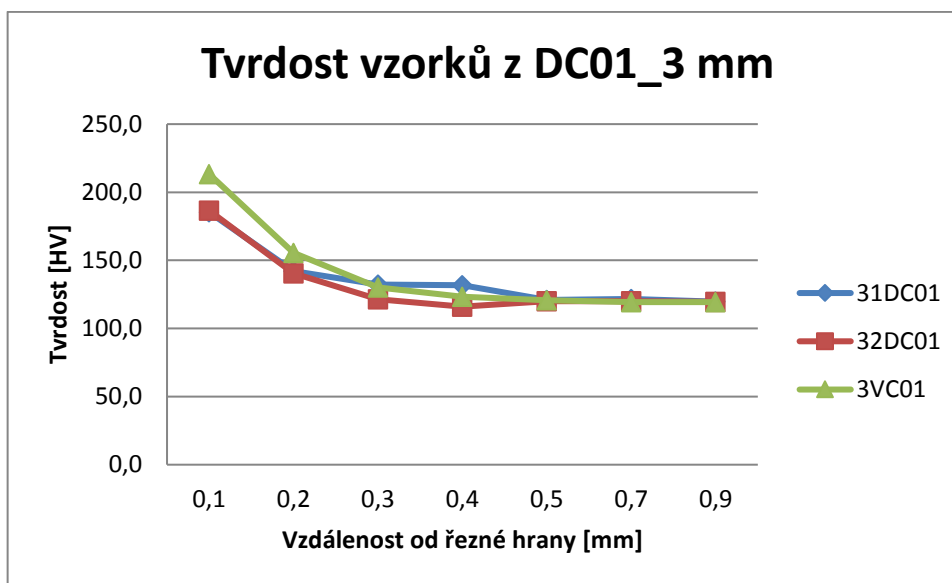
A) DC01_3 mm

Do tabulky 30 byly zapsány výsledky měření tvrdosti vzorků z materiálu DC01 tloušťky 3 mm.

Tabulka 30 Výsledky měření drsnosti pro výpalky z materiálu DC01 tloušťky 3 mm

Vzdálenost od hrany	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9
31DC01	185,3	142,0	132,3	131,7	121,0	121,7	119,7
32DC01	186,5	140,5	121,5	116	120	120	119,5
3VC01	213,3	155,6	130	123,3	120,66	119,33	119,33

Dle výsledků měření tvrdosti byl sestrojen graf 21, který graficky znázorňuje výsledky měření.



Graf 21 Tvrdost vzorků z DC01_3 mm

Z grafu 21 a tabulky 30 je jasné, že největší tvrdost v okolí řezné hrany má vzorek značený 3VDC01. Nepatrný nárůst tvrdosti ve vzdálenosti 0,4 mm oproti ostatním vzorkům projevuje vzorek značený 31DC01. Tedy vzorek 32DC02 má nejnižší tvrdost v celém průřezu plechu od řezné hrany do vzdálenosti 0,9 mm.

B) DC01_6 mm

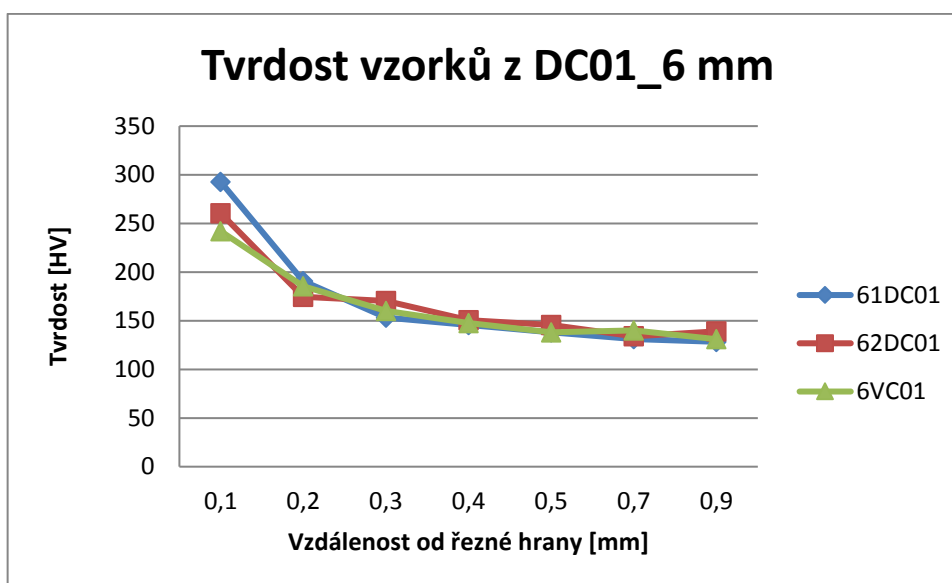
Tabulka 31 obsahuje výsledky měření tvrdosti vzorků z materiálu DC01 tloušťky 6 mm.

Tabulka 31 Výsledky měření drsnosti pro výpalky z materiálu DC01 tloušťky 6 mm

Vzdálenost od hrany	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9
61DC01	292,66	190,66	153,33	145,63	138,22	131	128,33
62DC01	260,5	174,5	170,3	150,6	145,5	134	139
6VC01	242	185,5	160	147,5	138	140	131

Pro lepší přehlednost výsledků byl sestrojen graf 22, který porovnává tvrdost zkoumaných vzorků.

Vzorek značený 61DC01 má nejvíce ovlivněnou tvrdost parametry laserového řezání, tento fakt je patrný z výsledků měření v tabulce 31 i z grafu 22. Další dva vzorky značené jako 62DC01 a 6VDC01 mají velmi podobné průběhy tvrdosti a hodnoty výsledků tvrdosti v závislosti na vzdálenosti od řezné hrany.



Graf 22 Tvrdost vzorků z DC01_6 mm

6.2.2 S235JR

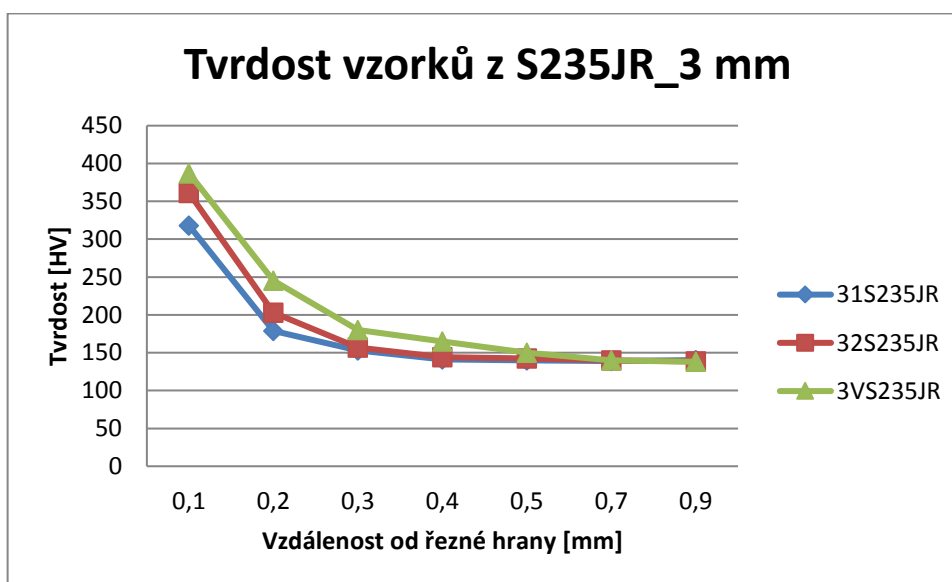
A) S235JR_3 mm

Tabulka 32 obsahuje výsledky měření tvrdosti vzorků z materiálu S235JR tloušťky 3 mm.

Tabulka 32 Výsledky měření drsnosti pro výpalky z materiálu S235JR tloušťky 3 mm

Vzdálenost od hrany	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9
31S235JR	318	179	153	141	140	139	140,5
32S235JR	361	203	157	144	142,5	140	138,5
3VS235JR	387	245	180	165	150	140	138

Grafické znázornění výsledků grafem 23. Zobrazuje výsledné křivky tvrdosti pro vzorky z uvedeného materiálu. Vzorek označený jako 3VS235JR má výsledky tvrdosti největší v celé měřené vzdálenosti od řezané hrany. Naopak vzorek značený jako 31S235JR má nejnižší tvrdost v celé délce.



Graf 23 Tvrdost vzorků z S235JR_3 mm

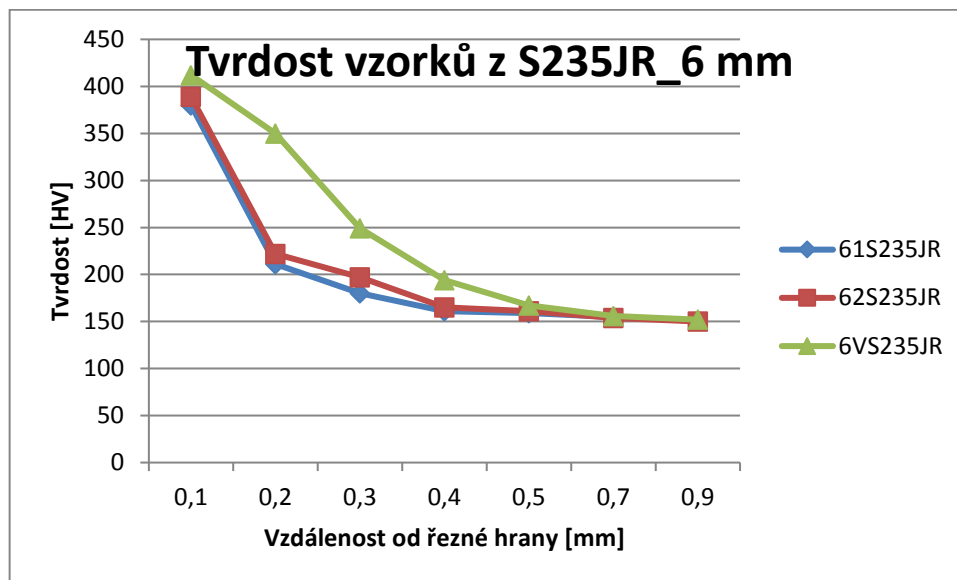
B) S235JR _6 mm

Tabulka 33 obsahuje výsledky měření tvrdosti vzorků z materiálu S235JR tloušťky 6 mm.

Tabulka 33 Výsledky měření drsnosti pro výpalky z materiálu S235JR tloušťky 6 mm

Vzdálenost od hrany	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9
61S235JR	380	211	180	161	159	155	151
62S235JR	389	222	197	165	161	154	150
6VS235JR	412	350	249	194	167	156	152

Graf 24 a tabulka 33 znázorňují jasný rozdíl tvrdosti vzorku značeného jako 6VS235JR. Tento vzorek má výrazně vyšší tvrdost v celé délce měření oproti ostatním dvěma výpalkům. Naopak rozdíl mezi vzorky značenými jako 61S235JR a 62S235JR jsou skoro nepatrné, přesto nižší tvrdost v celé délce měření prokazuje vzorek 61S235JR.



Graf 24 Tvrdost vzorků z S235JR_6 mm

6.2.3 C45

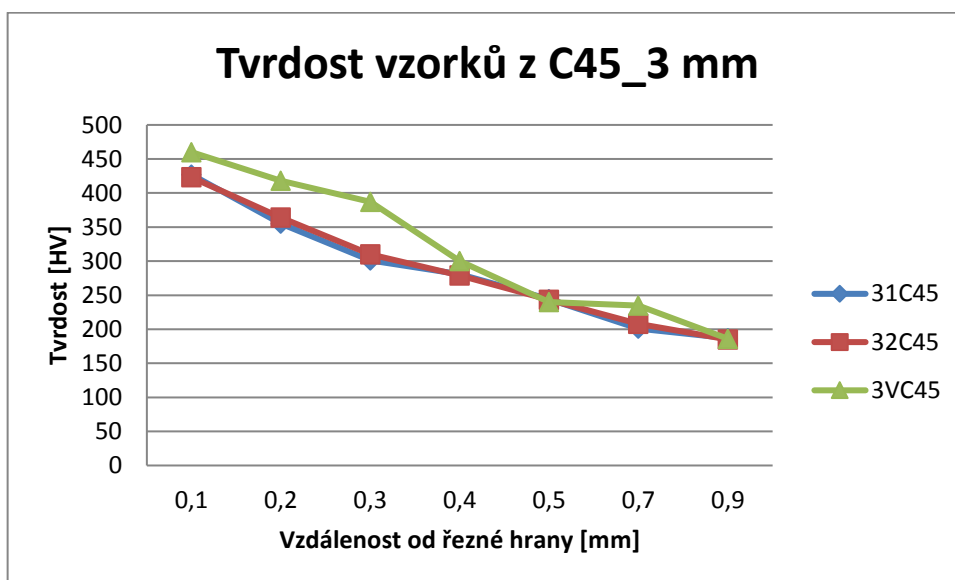
A) C45_3 mm

Tabulka 34 obsahuje výsledky měření tvrdosti vzorků z materiálu C45 tloušťky 3 mm.

Tabulka 34 Výsledky měření drsnosti pro výpalky z materiálu C45 tloušťky 3 mm

Vzdálenost od hrany	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9
31C45	427	355	301	281	244	201	187
32C45	423	364	310	279	243	208	185
3VC45	460	418	387	300	240	235	186

Z naměřených výsledků v tabulce 34 byl sestaven graf 25, který zobrazuje grafickou závislost vzorků na vzdálenosti od řezné hrany. Z grafu je patrné, že vzorek 3VC45 má po řezání laserem nejtvrďší strukturu povrchu. Další dva vzorky značené 31C45 a 32C45 mají závislosti tvrdosti na vzdálenosti od řezné hrany velmi podobnou, ale dle naměřených hodnot vzorek 31C45 má strukturu v celé délce měkčí.



Graf 25 Tvrdost vzorků z C45_3 mm

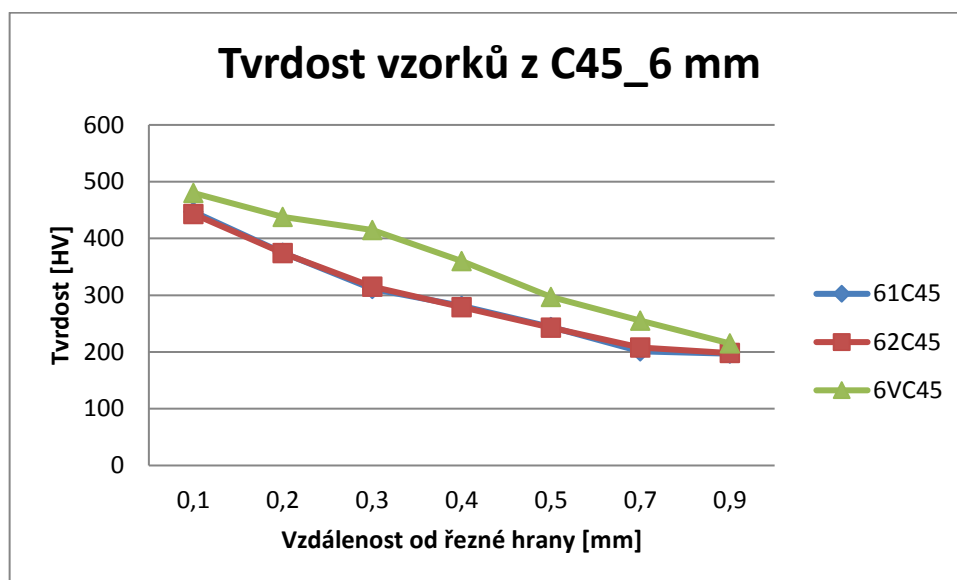
B) C45_6 mm

Tabulka 35 obsahuje výsledky měření tvrdosti vzorků z materiálu C45 tloušťky 6 mm.

Tabulka 35 Výsledky měření drsnosti pro výpalky z materiálu C45 tloušťky 6 mm

Vzdálenost od hrany	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9
61C45	447	375	311	281	244	201	197
62C45	443	374	315	279	243	208	198
6VC45	480	438	415	360	297	255	215

Pro vyhodnocení závislosti tvrdosti povrchu na vzdálenosti od řezné hrany byl vytvořen graf 26, ze kterého je patrná největší tvrdost u vzorku značeného jako 6VC45. Další dva vzorky značené jako 61C45 a 62C45 mají průběh tvrdosti skoro shodný ale výrazně nižší než vzorek 6VC45.



Graf 26 Tvrdost vzorků z C45_6 mm

6.2.4 EN X5CrNi18-10

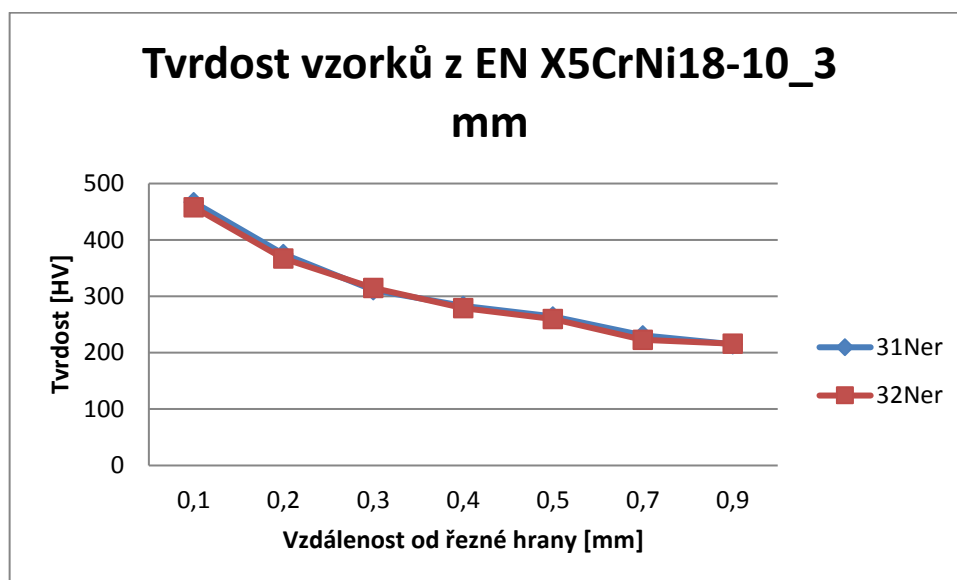
A) EN X5CrNi18-10_3 mm

Tabulka 36 obsahuje výsledky měření tvrdost vzorků z materiálu EN X5CrNi18-10 tloušťky 3 mm.

Tabulka 36 Výsledky měření drsnosti pro výpalky z materiálu EN X5CrNi18-10 tloušťky 3 mm

Vzdálenost od hrany	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9
31Ner	467	375	311	281	264	231	215
32Ner	458	367	315	279	260	223	216

Graf 27 vyobrazuje téměř totožný průběh závislosti tvrdost na vzdálenosti od řezné hrany pro vzorky značené jako 31Ner a 32Ner. Numerické výsledky v tabulce 36 tuto totožnou závislost potvrzují, není tedy možné rozhodnout, který vzorek má tvrdost struktury méně či více ovlivněnou.



Graf 27 Tvrđost vzorků z EN X5CrNi18-10_3 mm

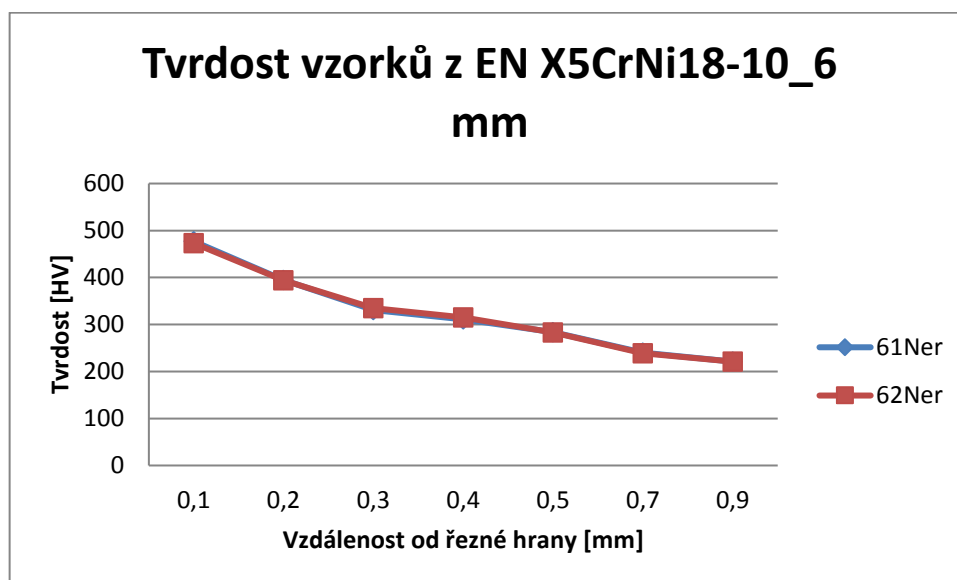
B) EN X5CrNi18-10_6 mm

Tabulka 37 obsahuje výsledky měření tvrdosti vzorků z materiálu EN X5CrNi18-10 tloušťky 6 mm.

Tabulka 37 Výsledky měření drsnosti pro výpalky z materiálu EN X5CrNi18-10 tloušťky 6 mm

Vzdálenost od hrany	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9
61Ner	477	395	331	311	284	240	221
62Ner	473	394	335	315	283	239	221

Pro vzorky 61Ner a 62Ner je stejně jako v předchozím případě pro materiál EN X5CrNi18-10 těžké rozhodnout, u kterého vzorku byla tvrdost méně či více ovlivněna parametry laseru. Průběh obou závislostí v grafu 28 i naměřené hodnoty v tabulce 37 jsou téměř totožné.



Graf 28 Tvrdość vzorků z EN X5CrNi18-10_6 mm

6.2.5 Hliníková slitina AlMg3

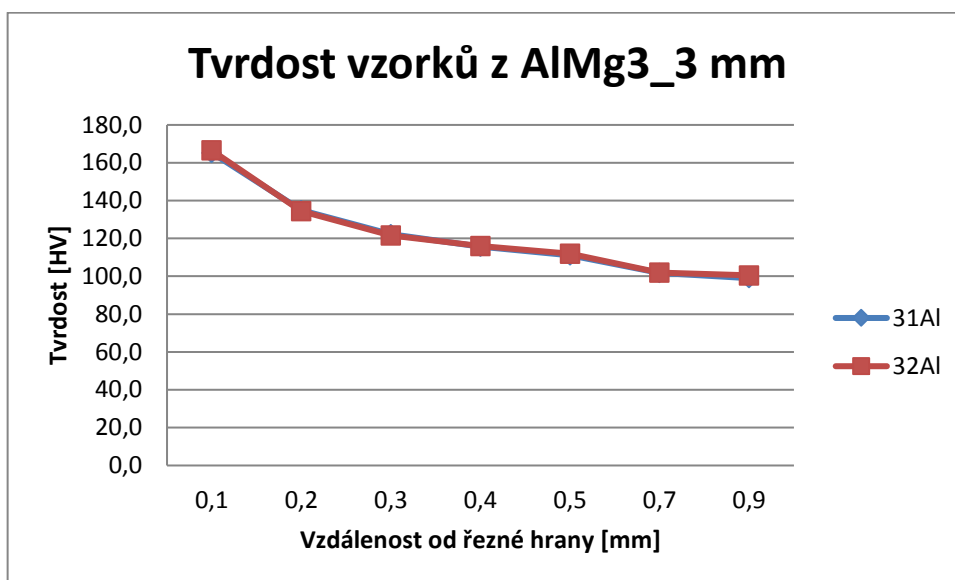
A) AlMg3_3 mm

Tabulka 38 obsahuje výsledky měření tvrdość vzorků z materiálu AlMg3 tloušťky 3 mm.

Tabulka 38 Výsledky měření drsnosti pro výpalky z materiálu AlMg3 tloušťky 3 mm

Vzdálenost od hrany	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9
31Al	165,3	135,0	122,3	115,7	111,0	101,7	99,0
32Al	166,5	134,5	121,5	116	112	102	100,5

Hodnocení tvrdość vzorků z materiálu AlMg3 je opět založeno na grafickém porovnání závislostí tvrdość na vzdálenosti od řezné hrany grafem 29. A na číselném porovnání měřených výsledků v tabulce 38. Jak je z obou zdrojů patrné, průběh křivek u obou vzorků je téměř totožný a naměřené hodnoty také. Není tedy možné určit, jak byla tvrdość u těchto dvou vzorků značených 32Al a 31Al ovlivněna nastavením parametrů laseru.



Graf 29 Tvrđost vzorků z AlMg3_3 mm

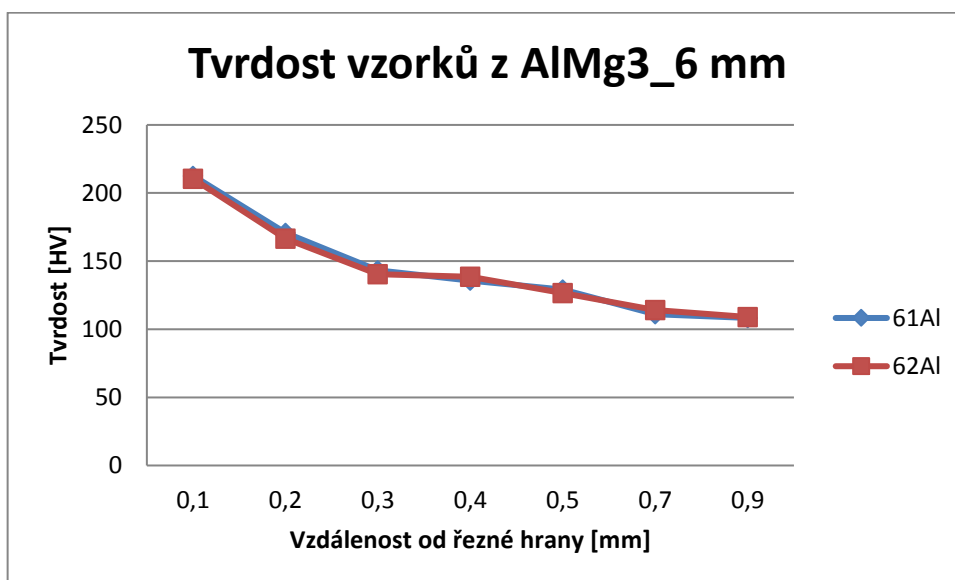
B) AlMg3_6 mm

Tabulka 39 obsahuje výsledky měření tvrdosti vzorků z materiálu AlMg3 tloušťky 6 mm.

Tabulka 39 Výsledky měření drsnosti pro výpalky z materiálu AlMg3 tloušťky 6 mm

Vzdálenost od hrany	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9
61Al	212,66	170,66	143,33	135,63	129,22	111	108,33
62Al	210,5	166,5	140,3	138,6	126,5	114	109

Pro vyhodnocení tvrdosti u vzorků značených jako 61Al a 62Al byl opět sestrojen graf závislosti tvrdosti na vzdálenosti od řezné hrany. Z tohoto grafu 30 je patrné, že vzorek 62Al má nepatrně nižší tvrdost od hrany řezné plochy do vzdálenosti 0,4 mm. Poté se tvrdosti obou vzorků téměř srovnají.



Graf 30 Tvrđost vzorků z AlMg3_6 mm

6.3 Drsnost

Drsnost je další z mnoha parametrů, kterým je možné vyjádřit kvalitu řezné plochy po řezání laserem. Od drsnosti plochy se odvíjí další zpracování materiálu vyrobeného laserovým pálením. Lze říci, čím lepší drsnost má řezná plocha, tím kvalitnější řez je proveden.

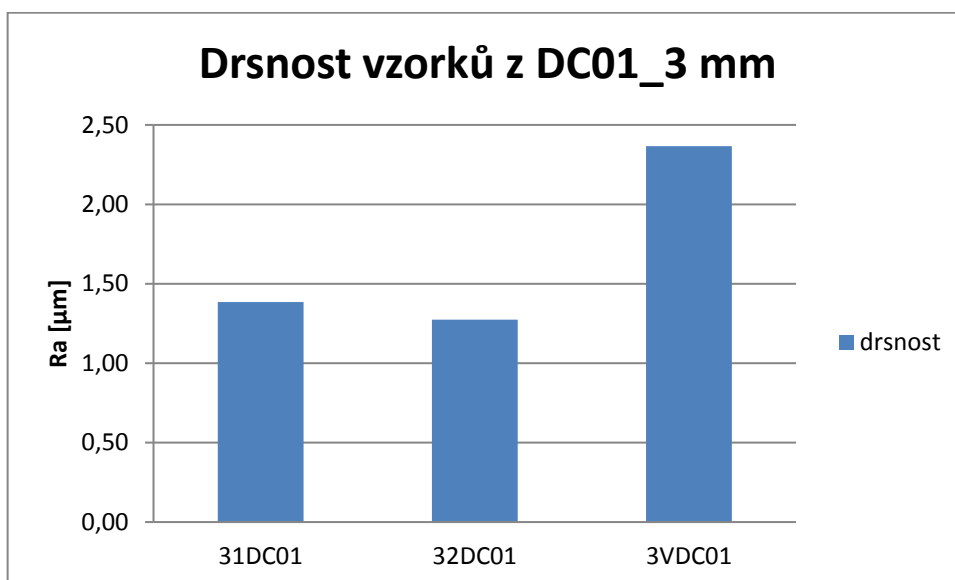
6.3.1 DC01

A) DC01_3 mm

Tabulka 40 obsahuje výsledky měření drsnosti vzorků z materiálu DC01 tloušťky 3 mm.

Tabulka 40 Výsledky měření drsnosti pro vzorky z materiálu DC01 tloušťky 3 mm

	1	2	3	4	5	Střední hodnota
31DC01	1,04	1,52	1,52	1,39	1,45	1,38
32DC01	1,98	1,01	0,81	1,27	1,3	1,27
3VC01	2,28	2,23	2,51	2,41	2,4	2,37



Graf 31 Drsnost vzorků z DC01_3 mm

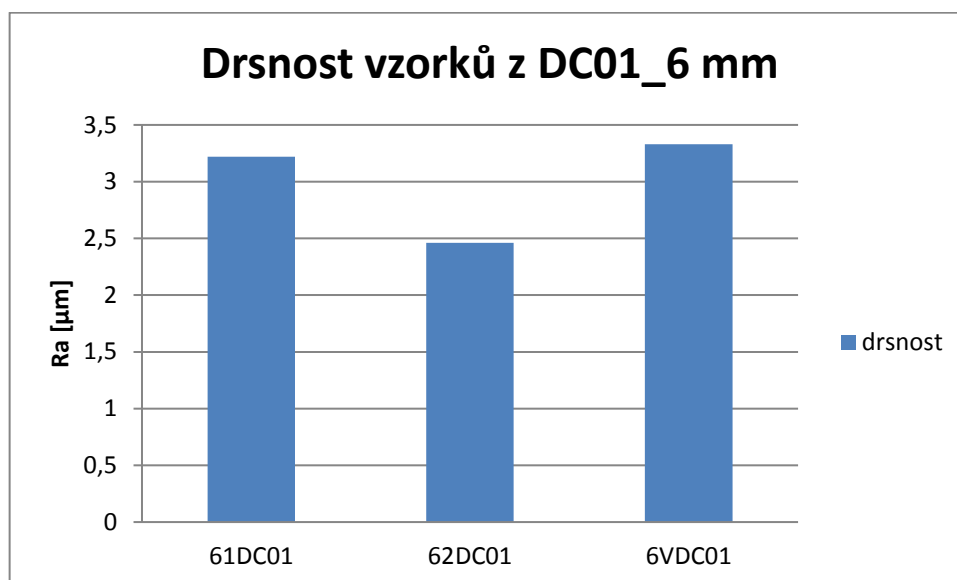
Dle grafu 31 a výsledkům z tabulky 40 je patrné, že nejlepší drsnost řezné hrany má vzorek označený 32DC01. Naopak nejhorší drsnost má vzorek značený 3VDC01.

B) DC01_6 mm

Tabulka 41 obsahuje výsledky měření drsnosti vzorků z materiálu DC01 tloušťky 6 mm.

Tabulka 41 Výsledky měření drsnosti pro vzorky z materiálu DC01 tloušťky 6 mm

	1	2	3	4	5	Střední hodnota
61DC01	2	3,55	3,55	3,58	3,42	3,22
62DC01	2	2,05	3,04	2,54	2,67	2,46
6VC01	2,442	3,152	3,82	3,62	3,62	3,33



Graf 32 Drsnost vzorků z DC01_6 mm

Graf 32 a tabulka 41 s výsledky měření drsnosti pro vzorky z materiálu DC01 tloušťky 6 mm jasně znázorňuje nejlepší drsnost řezné plochy u vzorku značeného 62DC01. Druhou nejlepší drsnost má vzorek 61DC01, a jen nepatrně největší, tedy nejhorší drsnost má poslední vzorek 6VDC01

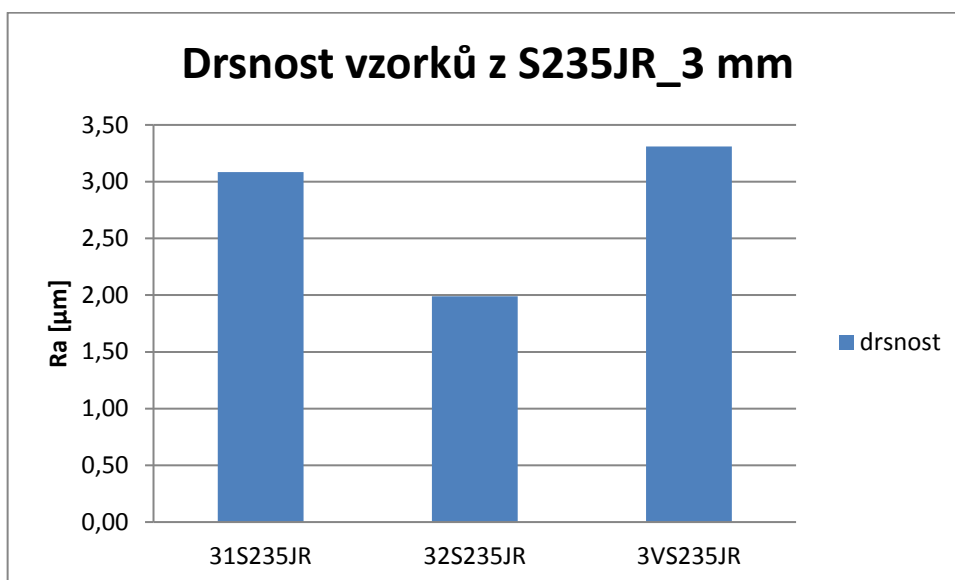
6.3.2 S235JR

A) S235JR _3 mm

Tabulka 42 obsahuje výsledky měření drsnosti vzorků z materiálu S235JR tloušťky 3 mm.

Tabulka 42 Výsledky měření drsnosti pro vzorky z materiálu S235JR tloušťky 3 mm

	1	2	3	4	5	Střední hodnota
31S235JR	3,04	3,55	2,28	3,25	3,3	3,08
32S235JR	1,52	2,54	1,01	2,34	2,54	1,99
3VS235JR	3,15	3,65	3,1	2,98	3,67	3,31



Graf 33 Drsnost vzorků z S235JR_3 mm

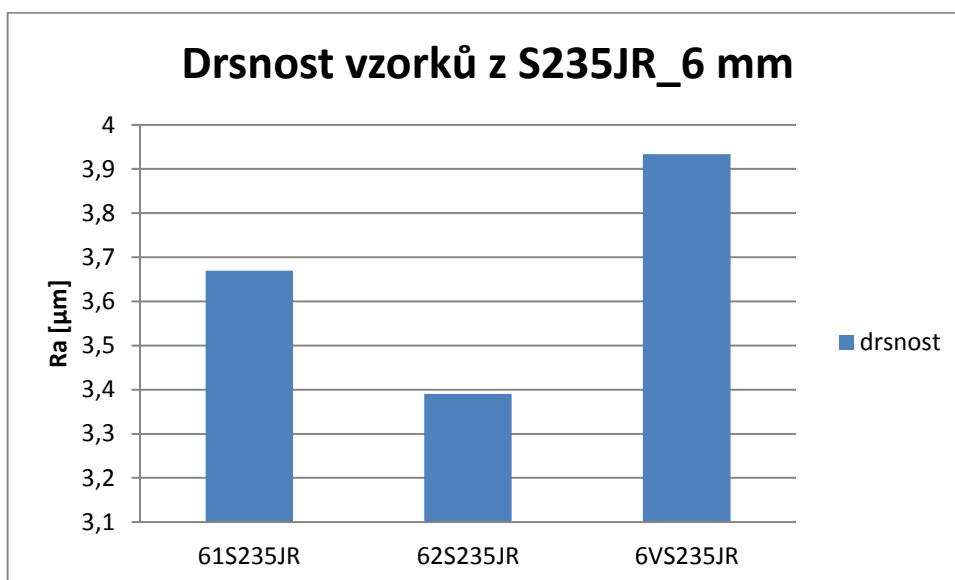
Graf 33, který prezentuje naměřené hodnoty drsnosti z tabulky 42, jasně ukazuje nejlepší hodnotu drsnosti u vzorku značeného jako 32S235JR. Naopak nejhorší, tedy nejvyšší drsnost má vzorek 3VS235JR

B) S235JR _6 mm

Tabulka 43 obsahuje výsledky měření drsnosti vzorků z materiálu S235JR tloušťky 6 mm.

Tabulka 43 Výsledky měření drsnosti pro vzorky z materiálu S235JR tloušťky 6 mm

	1	2	3	4	5	Střední hodnota
61S235JR	3,74	3,85	3,38	3,45	3,93	3,67
62S235JR	3,52	3,54	3,01	3,34	3,54	3,39
6VS235JR	3,85	3,96	3,91	3,98	3,97	3,93



Graf 34 Drsnost vzorků z S235JR_6 mm

Pro materiál S235JR tloušťky 6 mm má nejlepší hodnoty, tedy nejnižší drsnost vzorek značený jako 62S235JR. Nejhorší hodnotu drsnosti z materiálu zmíněné tloušťky a jakosti má vzorek značený 6VS235JR.

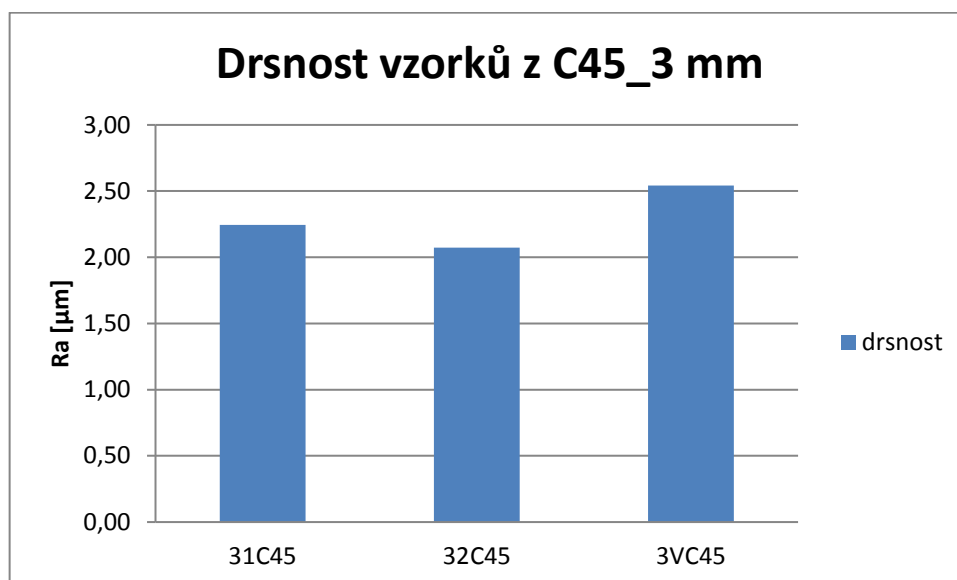
6.3.3 C45

A) C45 _3 mm

Tabulka 44 obsahuje výsledky měření drsnosti vzorků z materiálu C45 tloušťky 3 mm.

Tabulka 44 Výsledky měření drsnosti pro vzorky z materiálu C45 tloušťky 3 mm

	1	2	3	4	5	Střední hodnota
31C45	2,04	2,12	2,22	2,39	2,45	2,24
32C45	1,98	2,01	1,81	2,27	2,3	2,07
3VC45	2,58	2,63	2,45	2,61	2,44	2,54



Graf 35 Drsnost vzorků z C45_3 mm

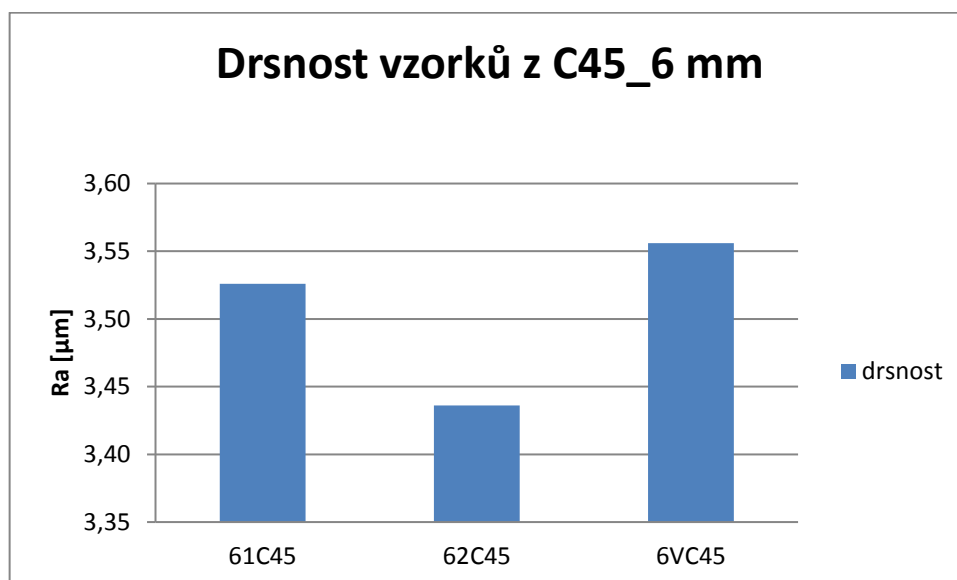
Graf 35, který znázorňuje střední hodnotu drsností změřených v experimentu a zapsaných v tabulce 44. Z grafu a z hodnot v tabulce je patrné, že nejlepší kvalitu řezné plochy, tedy nejnižší drsnost má vzorek označený jako 32C45. Oproti tomu, nejhorší kvalitu povrchu, tedy největší drsnost má vzorek značený 3VC45.

B) C45_6 mm

Tabulka 45 obsahuje výsledky měření drsnosti vzorků z materiálu C45 tloušťky 6 mm.

Tabulka 45 Výsledky měření drsnosti pro vzorky z materiálu C45 tloušťky 6 mm

	1	2	3	4	5	Střední hodnota
61C45	3,5	3,47	3,66	3,58	3,42	3,53
62C45	3,2	3,53	3,76	3,38	3,31	3,436
6VC45	3,52	3,54	3,32	3,78	3,62	3,56



Graf 36 Drsnost vzorků z C45_6 mm

Z grafu 36 je jasně patrný vzorek s nejlepší drsností povrchu, je to vzorek značený jako 62C45. Ostatní dva vzorky v této části experimentu měli o poznání horší kvalitu povrchu po řezání laserem, měli tedy vyšší drsnost než prvně zmíněný vzorek. Ale oba horší vzorky značené 61C45 a 6VC45 měli téměř shodnou hodnotu drsnosti povrchu po řezání laserem.

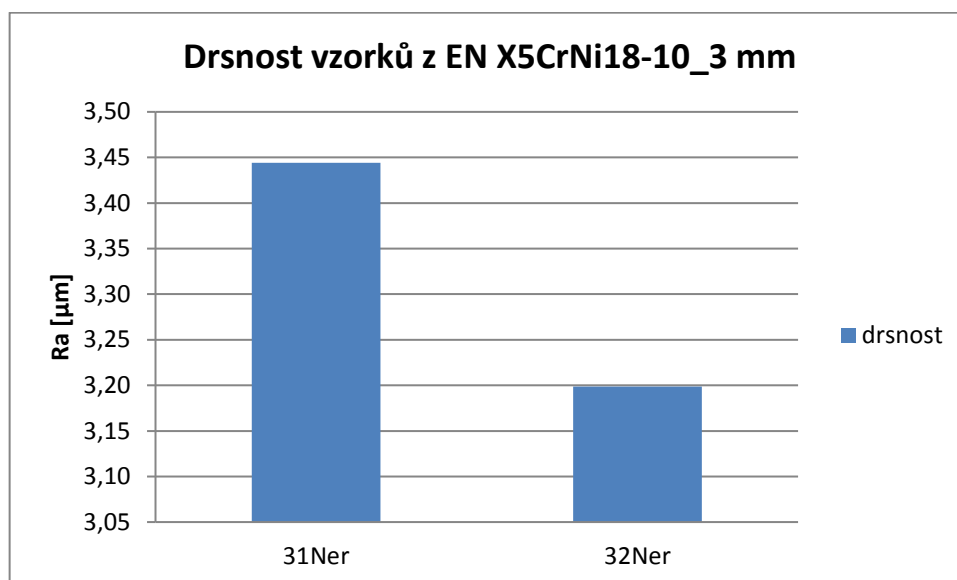
6.3.4 EN X5CrNi18-10

A) EN X5CrNi18-10_3 mm

Tabulka 46 obsahuje výsledky měření drsnosti vzorků z materiálu EN X5CrNi18-10 tloušťky 3 mm.

Tabulka 46 Výsledky měření drsnosti pro vzorky z materiálu EN X5CrNi18-10 tloušťky 3 mm

	1	2	3	4	5	Střední hodnota
31Ner	3,56	4,11	3,25	3,23	3,07	3,44
32Ner	3,30	3,10	3,30	3,25	3,04	3,20



Graf 37 Drsnost vzorků z EN X5CrNi18-10_3 mm

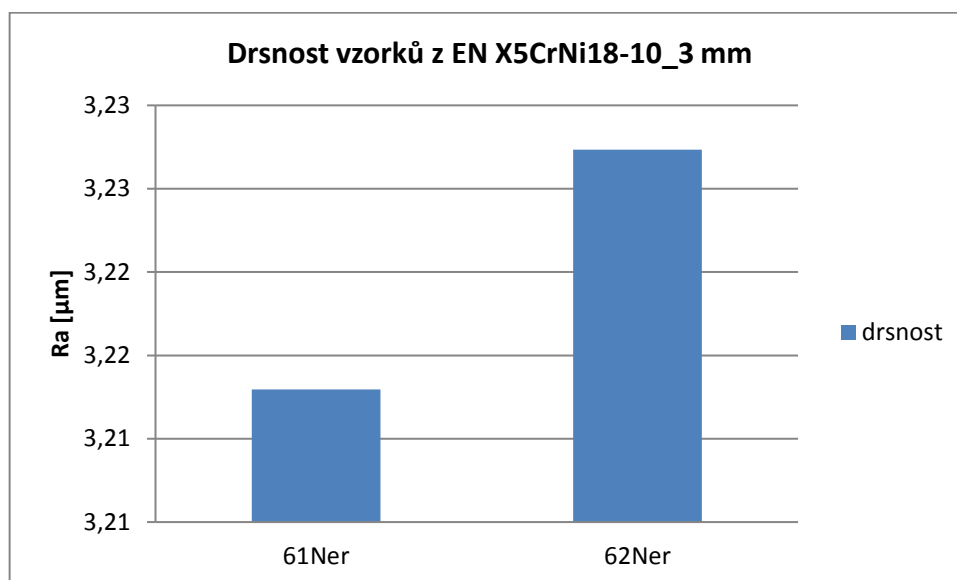
V této části experimentu byly porovnávány vzorky z materiálu EN X5CrNi18-10 tloušťky 3 mm. Horší drsnost měl vzorek značený jako 31Ner. Rozdíl hodnot drsností je znázorněn v grafu 37.

B) EN X5CrNi18-10_6 mm

Tabulka 47 obsahuje výsledky měření drsnosti vzorků z materiálu EN X5CrNi18-10 tloušťky 6 mm.

Tabulka 47 Výsledky měření drsnosti pro vzorky z materiálu EN X5CrNi18-10 tloušťky 6 mm

	1	2	3	4	5	Střední hodnota
61Ner	3,35	3,09	3,35	3,26	3,02	3,21
62Ner	3,40	3,07	3,40	3,27	2,99	3,23



Graf 38 Drsnost vzorků z EN X5CrNi18-10_3 mm

Výsledek z měření drsnosti povrchu po řezání laserem je při porovnání hodnot a grafu 38 téměř shodný pro oba vzorky, ale přece jen nepatrně lepší drsnost materiálu, tedy menší hodnotu Ra měl vzorek značený 61Ner.

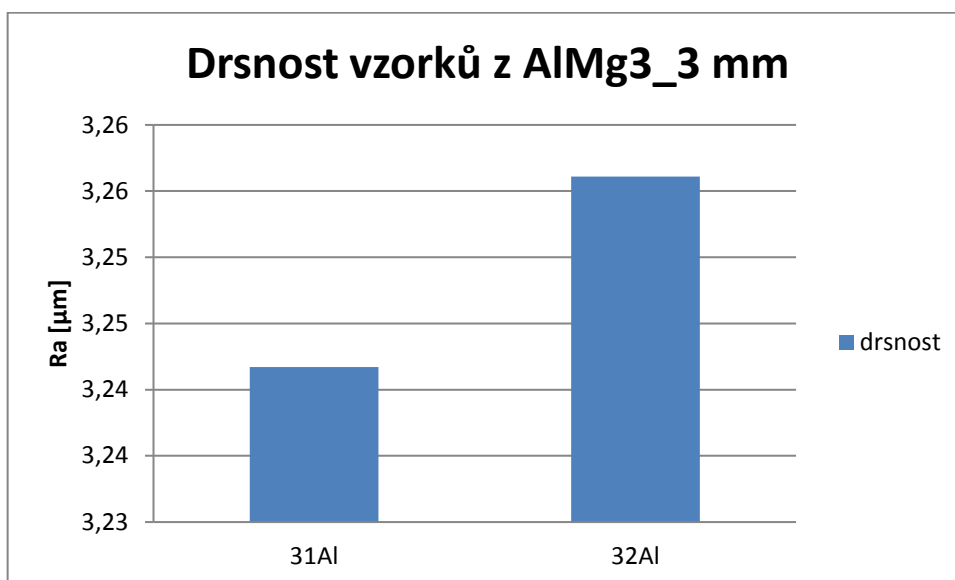
6.3.5 Hliníková slitina AlMg3

A) AlMg3_3 mm

Tabulka 48 obsahuje výsledky měření drsnosti vzorků z materiálu AlMg3 tloušťky 3 mm.

Tabulka 48 Výsledky měření drsnosti pro vzorky z materiálu AlMg3 tloušťky 3 mm

	1	2	3	4	5	Střední hodnota
31Al	3,44	3,06	3,45	3,28	2,97	3,24
32Al	3,49	3,05	3,50	3,29	2,95	3,26



Graf 39 Drsnost vzorků z AlMg3_3 mm

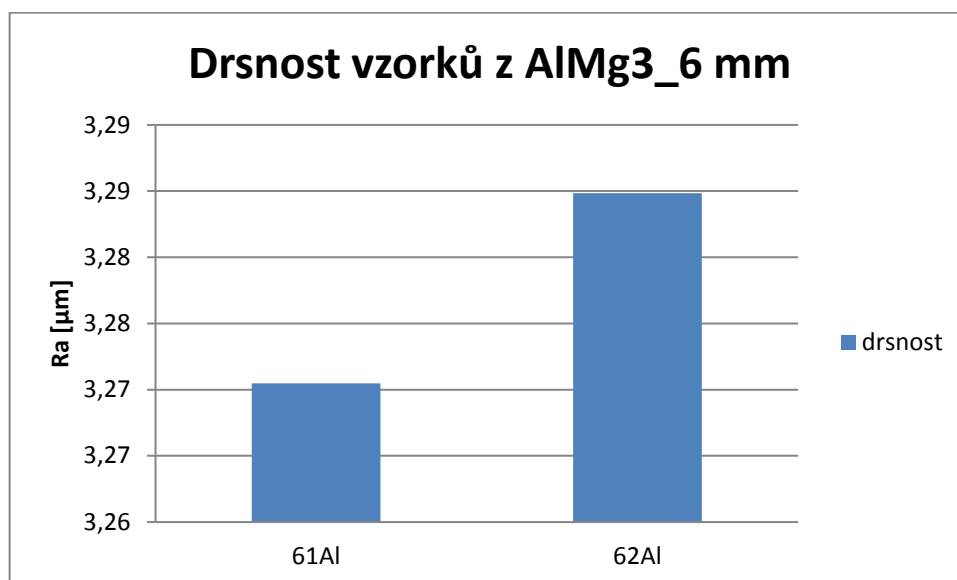
Výsledek drsnosti Ra pro vzorky z materiálu AlMg3 tloušťky 3 mm je také velmi těsný. Dle grafu 39 a tabulky s naměřenými hodnotami je dokázané, že vzorek značený jako 31Al má hodnotu drsnosti Ra lehce menší než vzorek 32Al.

B) AlMg3_6 mm

Tabulka 49 obsahuje výsledky měření drsnosti vzorků z materiálu AlMg3 tloušťky 6 mm.

Tabulka 49 Výsledky měření drsnosti pro vzorky z materiálu AlMg3 tloušťky 6 mm

	1	2	3	4	5	Střední hodnota
61Al	3,53	3,04	3,55	3,30	2,92	3,27
62Al	3,58	3,03	3,60	3,32	2,90	3,28



Graf 40 Drsnost vzorků z AlMg3_6 mm

Výsledek drsnosti Ra pro vzorky z materiálu AlMg3 tloušťky 6 mm je velmi těsný. Dle grafu 40 a tabulky s naměřenými hodnotami je ale patrné, že vzorek značený jako 61Al má hodnotu drsnosti Ra lehce menší než vzorek 62Al.

6.4 Velikost otřepů a optická kontrola

Velikost otřepů je jedno z kritérií, které bylo v experimentu vyhodnoceno. Tabulky v podkapitolách jsou výsledky hodnotících kritérií, které byly popsány v teoretické části. Vzhledem k jasnosti hodnotícího faktoru nebyl zapotřebí podrobný rozbor výsledků.

6.4.1 DC01

A) DC01_3 mm

Tabulka 50 Velikost otřepů pro vzorky z DC01_3 mm

	Hodnocení otřepu a optická kontrola
31DC01	4
32DC01	4
3VC01	3

B) DC01_6 mm

Tabulka 51 Velikost otřepů pro vzorky z DC01_6 mm

	Hodnocení otřepu a optická kontrola
61DC01	4
62DC01	4
6VC01	3

6.4.2 S235JR**A) S235JR_3 mm**

Tabulka 52 Velikost otřepů pro vzorky z S235JR_3 mm

	Hodnocení otřepu a optická kontrola
31S235JR	4
32S235JR	4
3VS235JR	3

B) S235JR_6 mm

Tabulka 53 Velikost otřepů pro vzorky z S235JR_6 mm

	Hodnocení otřepu a optická kontrola
61S235JR	4
62S235JR	4
6VS235JR	3

6.4.3 C45**A) C45_3 mm**

Tabulka 54 Velikost otřepů pro vzorky z C45_3 mm

	Hodnocení otřepu a optická kontrola
31C45	4
32C45	4
3VC45	3

B) C45_6 mm

Tabulka 55 Velikost otřepů pro vzorky z C45_6 mm

	Hodnocení otřepu a optická kontrola
61C45	4
62C45	4
6VC45	3

6.4.4 EN X5CrNi18-10**A) EN X5CrNi18-10_3 mm**

Tabulka 56 Velikost otřepů pro vzorky z EN X5CrNi18-10_3 mm

	Hodnocení otřepu a optická kontrola
31Ner	4
32Ner	4

B) EN X5CrNi18-10_6 mm

Tabulka 57 Velikost otřepů pro vzorky z EN X5CrNi18-10_6 mm

	Hodnocení otřepu a optická kontrola
61Ner	4
62Ner	4

6.4.5 Hliníková slitina AlMg3**A) AlMg3_3 mm**

Tabulka 58 Velikost otřepů pro vzorky z AlMg3_3 mm

	Hodnocení otřepu a optická kontrola
31Al	4
32Al	4

B) AlMg3_6 mm

Tabulka 59 Velikost otřepů pro vzorky z AlMg3_6 mm

	Hodnocení otřepu a optická kontrola
61Al	4
62Al	4

7 DISKUSE A VZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ Z PRVNÍ ČÁSTI EXPERIMENTU

Pro přehlednější vyhodnocení a diskusi výsledků nastavení parametru laserového stroje pro jednotlivé materiály tedy pro: DC01; S235JR; C45; EN X5CrNi18-10; AlMg3 byly použity tabulky s vyhodnocením jednotlivých měřených vlastností v průběhu experimentu, tedy: rozměrová přesnost, tvrdost, drsnost, otřepy a na základě pořadí jednotlivých vzorků byly pro každý materiál vyhodnoceny nej kvalitnější vzorky a byly vypsány doporučené parametry nastavení laserového stroje pro každý z materiálů.

7.1 DC01

7.1.1 DC01_3 mm

Tabulka 60 Hodnocení výsledků pro materiál DC01_3 mm

	přesnost	tvrdost	drsnost	otřepy	celkem
31DC01	2	2	2	1	2
32DC01	1	1	1	1	1
3VC01	3	3	3	2	3

Parametry nastavení laseru, kterými byl vyroben vzorek 32DC01 jsou vyhodnoceny jako nejvhodnější pro výrobu z materiálu DC01 tloušťky 3 mm. Jedná se o parametry, které byly firmou HKD Třebíč poprvé odzkoušeny při experimentu.

Tabulka 61 Doporučené parametry pro materiál DC01 tloušťky 3 mm

Material: DC01 Thickness: 3 mm						
No.	Feed rate [mm/min]	Power [W]	Freq	Duty [%]	Gas Press [MPa]	Gas kind
32DC01	2700	3000	2200	95	6	O

7.1.2 DC01_6 mm

Tabulka 62 Hodnocení výsledků pro materiál DC01_6 mm

	přesnost	tvrdost	drsnost	otřepy	celkem
61DC01	3	2	2	1	3
62DC01	2	1	1	1	1
6VDC01	1	1	3	2	2

Parametry nastavení laseru, kterými byl vyroben vzorek 62DC01 jsou vyhodnoceny jako nejvhodnější pro výrobu z materiálu DC01 tloušťky 6 mm. Jedná se o parametry, které byly firmou HKD Třebíč poprvé odzkoušeny při experimentu.

Tabulka 63 Doporučené parametry pro materiál DC01 tloušťky 6 mm

Material: DC01 Thickness: 6 mm						
No.	Feed rate [mm/min]	Power [W]	Freq	Duty [%]	Gas Press [MPa]	Gas kind
62DC01	2500	3000	2200	88	6	O

7.2 S235JR

7.2.1 S235JR_3 mm

Tabulka 64 Hodnocení výsledků pro materiál S235JR_3 mm

	přesnost	tvrdost	drsnost	otřepy	celkem
31S235JR	3	1	2	1	2
32S235JR	1	2	1	1	1
3VS235JR	2	3	3	2	3

Parametry nastavení laseru, kterými byl vyroben vzorek 32S235JR jsou vyhodnoceny jako nejvhodnější pro výrobu z materiálu S235JR tloušťky 3 mm. Jedná se o parametry, které byly firmou HKD Třebíč poprvé odzkoušeny při experimentu.

Tabulka 65 Doporučené parametry pro materiál S235JR tloušťky 3 mm

Material: S235JR				Thickness: 3 mm		
No.	Feed rate [mm/min]	Power [W]	Freq	Duty [%]	Gas Press [MPa]	Gas kind
32S235JR	2700	3000	2200	95	6	O

7.2.2 S235JR_6 mm

Tabulka 66 Hodnocení výsledků pro materiál S235JR_6 mm

	přesnost	tvrdost	drsnost	otřepy	celkem
61S235JR	3	1	2	1	2
62S235JR	2	1	1	1	1
6VS235JR	1	2	3	2	3

Parametry nastavení laseru, kterými byl vyroben vzorek 62S235JR jsou vyhodnoceny jako nejvhodnější pro výrobu z materiálu S235JR tloušťky 6 mm. Jedná se o parametry, které byly firmou HKD Třebíč poprvé odzkoušeny při experimentu.

Tabulka 67 Doporučené parametry pro materiál S235JR tloušťky 6 mm

Material: S235JR				Thickness: 6 mm		
No.	Feed rate [mm/min]	Power [W]	Freq	Duty [%]	Gas Press [MPa]	Gas kind
62S235JR	2500	3000	2200	88	6	O

7.3 C45

7.3.1 C45_3 mm

Tabulka 68 Hodnocení výsledků pro materiál C45_3 mm

	přesnost	tvrdost	drsnost	otřepy	celkem
31C45	1	1	2	1	1
32C45	1	2	1	1	1
3VC45	1	3	3	2	2

Parametry nastavení laseru, kterými byly vyrobeny vzorky 31C45 a 32C45 jsou vyhodnoceny jako nejvhodnější pro výrobu z materiálu C45 tloušťky 3 mm. Rozdílem v hodnocení byla pro vzorek 31C45 drsnost plochy po pálení laserem a pro 32C45 vzorek tvrdost řezné hrany. Je tedy na firmě HKD Třebíč, který parametr si zvolí.

Tabulka 69 Doporučené parametry pro materiál C45 tloušťky 3 mm

Material: C45 Thickness: 3 mm						
No.	Feed rate [mm/min]	Power [W]	Freq	Duty [%]	Gas Press [MPa]	Gas kind
31C45	2500	2000	1500	77	6	O
32C45	2700	3000	2200	95	6	O

7.3.2 C45_6 mm

Tabulka 70 Hodnocení výsledků pro materiál C45_6 mm

	přesnost	tvrdost	drsnost	otřepy	celkem
61C45	3	1	2	1	2
62C45	2	1	1	1	1
6VC45	1	2	3	2	3

Parametry nastavení laseru, kterými byl vyroben vzorek 62C45 jsou vyhodnoceny jako nejvhodnější pro výrobu z materiálu C45 tloušťky 6 mm. Jedná se o parametry, které byly firmou HKD Třebíč poprvé odzkoušeny při experimentu.

Tabulka 71 Doporučené parametry pro materiál C45 tloušťky 6 mm

Material: C45		Thickness: 6 mm				
No.	Feed rate [mm/min]	Power [W]	Freq	Duty [%]	Gas Press [MPa]	Gas kind
62C45	2500	3000	2200	88	6	O

7.4 EN X5CrNi18-10

7.4.1 EN X5CrNi18-10_3 mm

Tabulka 72 Hodnocení výsledků pro materiál EN X5CrNi18-10_3 mm

	přesnost	tvrdost	drsnost	otřepy	celkem
31Ner	2	1	2	1	2
32Ner	1	1	1	1	1

Parametry nastavení laseru, kterými byl vyroben vzorek 32Ner jsou vyhodnoceny jako nejvhodnější pro výrobu z materiálu EN X5CrNi18-10 tloušťky 3 mm. Jedná se o parametry, které byly firmou HKD Třebíč poprvé odzkoušeny při experimentu.

Tabulka 73 Doporučené parametry pro materiál X5CrNi18-10 tloušťky 3 mm

Material: X5CrNi18-10		Thickness: 3 mm				
No.	Feed rate [mm/min]	Power [W]	Freq	Duty [%]	Gas Press [MPa]	Gas kind
32Ner	2200	3000	2200	88	11	N

7.4.2 EN X5CrNi18-10_6 mm

Tabulka 74 Hodnocení výsledků pro materiál EN X5CrNi18-10_6 mm

	přesnost	tvrdost	drsnost	otřepy	celkem
61Ner	2	1	1	1	1
62Ner	1	1	2	1	1

Parametry nastavení laseru, pro materiál EN X5CrNi18-10 tloušťky 6 mm byly oba zvoleny jako nejlepší. Je tedy na firmě HKD Třebíč, které nastavení upřednostní. Rozdílem v hodnocení byla pro vzorek 61Ner přesnost a pro 62Ner vzorek drsnost řezné plochy.

Tabulka 75 Doporučené parametry pro materiál X5CrNi18-10 tloušťky 6 mm

Material: X5CrNi18-10 Thickness: 6 mm						
No.	Feed rate [mm/min]	Power [W]	Freq	Duty [%]	Gas Press [MPa]	Gas kind
61Ner	700	3000	2200	88	12	N
62Ner	1000	2500	2200	88	11	N

7.5 Hliníková slitina AlMg3

7.5.1 AlMg3_3 mm

Tabulka 76 Hodnocení výsledků pro materiál AlMg3_3 mm

	přesnost	tvrdost	drsnost	otřepy	celkem
31Al	1	1	1	1	1
32Al	1	1	2	1	2

Parametry nastavení laseru, kterými byl vyroben vzorek 31Al jsou vyhodnoceny jako nejvhodnější pro výrobu z materiálu AlMg3 tloušťky 3 mm. Jedná se o doporučené parametry firmou AMADA, tyto parametry firma HKD Třebíč používá při výrobě.

Tabulka 77 Doporučené parametry pro materiál AlMg3 tloušťky 3 mm

Material: AlMg3 Thickness: 3 mm						
No.	Feed rate [mm/min]	Power [W]	Freq	Duty [%]	Gas Press [MPa]	Gas kind
31Al	2000	2500	2000	80	10	N

7.5.2 AlMg3_6 mm

Tabulka 78 Hodnocení výsledků pro materiál AlMg3_6 mm

	přesnost	tvrdost	drsnost	otřepy	celkem
61Al	2	1	1	1	1
62Al	1	1	2	1	1

Parametry nastavení laseru, pro materiál AlMg3 tloušťky 6 mm byly oba zvoleny jako nejlepší. Je tedy na firmě HKD Třebíč, které nastavení upřednostní. Rozdílem v hodnocení byla pro vzorek 61Al přesnost a pro 62Al vzorek drsnost řezné plochy.

Tabulka 79 Doporučené parametry pro materiál AlMg3 tloušťky 6 mm

Material: AlMg3 Thickness: 6 mm						
No.	Feed rate [mm/min]	Power [W]	Freq	Duty [%]	Gas Press [MPa]	Gas kind
61Al	800	2500	2200	88	11	N
62Al	1000	3000	2200	88	13	N

8 EXPERIMENTÁRNÍ POROVNÁNÍ NEKONVENČNÍCH METOD OBRÁBĚNÍ

Kapitola experimentální porovnání nekonvenčních metod obrábění byla zahrnuta v této diplomové práci jako řešení projektu, který byl udělen diplomantovi firmou HKD Třebíč. Tato firma je ve fázi vybírání nového stroje pro účely zpracování plechů. Firma má již zpracovanou ekonomickou část (náklady na pořízení stroje, náklady na provoz stroje a jeho údržbu) a po diplomantovi požadovala experimentální vyhodnocení jednotlivých způsobů nekonvenčního obrábění (vláknový laser, vodní paprsek, vysekávací lis, plasma) z pohledu:

- přesnosti,
- drsnosti řezné plochy
- tvrdosti materiálu po obrábění
- mikrostruktury po obrábění
- moment pro řezání závitů do obrobené plochy
- test přilnavosti povrchové úpravy

Jako přednostní parametr volby možného nákupu nekonvenčního stroje určila firma HKD Třebíč přesnost metody, velikost momentu pro řezání závitů do obrobené plochy a test přilnavosti povrchové úpravy.

8.1 Výroba vzorků

V této kapitole budou popsány stroje a parametry použité pro výrobu vzorků pomocí nekonvenčních metod obrábění, tedy laserové řezání, řezání vodním paprskem, výroba vysekávacím lisem a řezání plasmou.

Materiál pro experiment byl určen S235JR o tloušťce 3 mm a 6 mm. Materiál této jakosti a tlouštěk je nejčastěji používaným ve výrobě firmy HKD Třebíč. Vlastnosti a popis tohoto materiálu 3.2.2.

Výroba vzorků proběhla díky dobrým vztahům diplomanta s firmami Jurka Třebíč a Mico Třebíč, které vlastní Vláknový laser, vysekávací lis, vodní paprsek a plasmový řezací stroj; tedy technologie, o kterých reálně uvažuje firma HKD Třebíč jako o možné investici.

8.1.1 Vlákenný laser

Vzorky pro experiment vyrobené vláknovým laserem byly dodány firmou Jurka Třebíč. Tato firma používá laser BySprint 3015 fibre, který je zobrazen na obrázku 30.

Pro experiment byly zkušeným technologem firmy Jurka Třebíč vybrány dva nejvyšší kvality vypálené vzorky z 3 mm plechu a dva nejvyšší kvality vyrobené vzorky z 6 mm plechu. Řezné parametry výroby pro vzorky z 3 mm plechu jsou popsány v tabulce 80 a těmto dvěma vzorkům bylo přiděleno označení NITROGEN_31 a NITROGEN_32. Parametry výroby vzorků z 6 mm plechu jsou uvedeny v tabulce 81. A bylo jim přiděleno označení NITROGEN_61 a NITROGEN_62.



Obrázek 31 laser BySprint 3015 fibre

Tabulka 80 Parametry nastavení vláknového laseru pro 3 mm plech

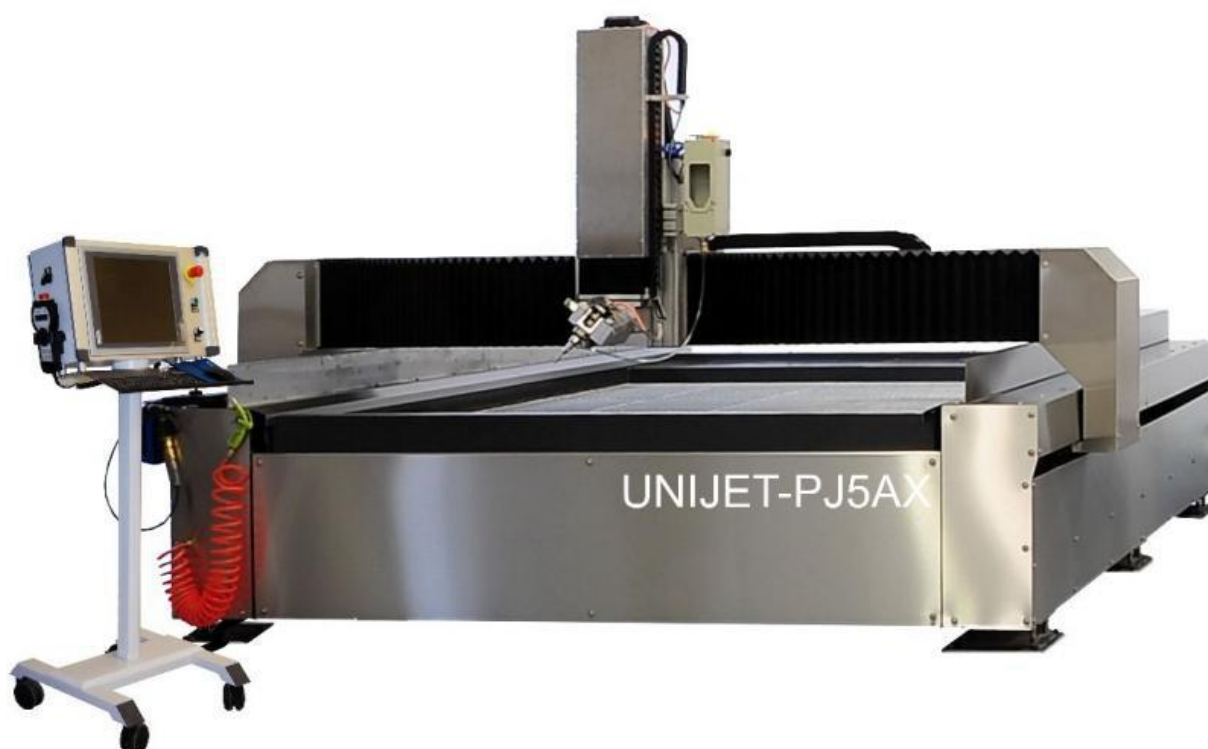
Material: S235JR				Thickness: 3 mm		
No.	Feed rate [mm/min]	Power [W]	Freq	Duty [%]	Gas Press [MPa]	Gas kind
Nitrogen_31	2600	3000	1500	70	1	3
Nitrogen_32	3500	3000	2200	95	1,2	3

Tabulka 81 Parametry nastavení vláknového laseru pro 6 mm plech

Material: S235JR				Thickness: 6 mm		
No.	Feed rate [mm/min]	Power [W]	Freq	Duty [%]	Gas Press [MPa]	Gas kind
Nitrogen_61	1600	3000	1500	70	1,2	3
Nitrogen_62	2700	3000	2200	95	1,6	3

8.1.2 Vodní paprsek

Firma Mico Třebíč dodala vzorky vyrobené na vodním paprsku typu UNIJET-PJAX. Těmto vzorkům bylo přiděleno označení WATER_3 pro vzorky z 3 mm plechu a WATER_6 pro vzorky z 6 mm plechu. Výroba vzorků z obou tloušťek materiálu proběhla za parametrů uvedených v tabulce 82.



Obrázek 32 Water jet machine UNIJET-PJ5AX [43]

Tabulka 82 Parametry nastavení vodního paprsku

Cutting parameter	Value of parameter
The diameter of the mixing tube	1,016 mm
The diameter of the nozzle	0,25 mm
The fluid pressure	600 MPa
Type of abrasive	Hagones
The size of the abrasive	80 MESCH
The mass flow rate of abrasive	0,4 kg · min ⁻¹

8.1.3 Vysekávací lis

Pro výrobu vzorků z vysekávacího lisu byl použit stroj FINN POWER F6, lis je zobrazen na obrázku 32. Výroba vzorků byla zastřešena díky spolupráci s firmou JURKA Třebíč.

Bohužel použitý vysekávací lis nemá dostatečné parametry pro výrobu vzorků z materiálu silnějšího než 5 mm, byl pro experiment použit pouze materiál o tloušťce 3 mm.

Jako další nevýhoda u výroby vzorku z vysekávacího lisu byl požadovaný tvar vzorku. Jelikož pro výrobu různých tvarů je potřeba různých raznic, nebyl na vzorku vyrobeného na vysekávacím lise aplikován požadovaný rádius R12.

Výroba vzorku probíhala dle nastavení stroje uvedených v tabulce 83.

Vzorek z plechu jakosti S235JR tloušťky 3 mm byl označen jako Punch_3.



Obrázek 33 Vysekávací lis Finn power 6

Tabulka 83 Použité parametry vysekávacího lisu

Cutting parameter	Value of parameter
Punching force	350 KN
The average time of lift	0.25 s
The maximum speed of movement in the X axe	90 [m/min]
The maximum speed of movement in the Y axe	60 [m/min]
Fast nibbling	600 [lift/min]
Slow nibbling	300 [lift/min]
The speed of rotation of the head	40 [rev/min]

8.1.4 Plasma

Díky spolupráci diplomanta s firmou Mico Třebíč byly dodány vzorky pro experiment také z řezání plazmou. Firma Mico Třebíč vlastní plazmový stroj Jackle, který je znázorněn na obrázku 33 dole.

Při výrobě nastal problém s vypálením otvoru na vzorku. Plazma bohužel není schopna kvalitně vypálit otvory o průměru 10,3 mm, jak je požadováno na výkrese vzorku. Otvory tedy vypáleny nebyly.

Výpalky z plazmového stroje byly také z materiálu S235JR a byly označeny jako Plasma_3 pro vzorek z 3 mm plechu a Plasma_6 pro vzorek z 6 mm plechu.



Obrázek 34 Plazmový stroj Jackle

8.2 Testování vzorků

V této kapitole je stejně jako v kapitole 5 popsáno testování vzorků vyrobených při experimentu. U každého vzorku byly změřeny následující vlastnosti:

- rozměrová přesnost
- tvrdost
- drsnost
- velikost otřepů a optická kontrola

Plus byly vyhodnoceny požadavky firmy HKD Třebíč, tedy:

- mikrostruktura materiálů po řezání
- moment pro řezání závitu do obrobené plochy
- test přilnavosti povrchové úpravy

Měření bylo také provedeno v laboratořích firmy HKD Třebíč, firmy Mann-Hummel a univerzity VUT Brno.

Výsledky z měření jsou detailně popsány v kapitole 8.3.

8.2.1 Rozměrová přesnost

Průběh měření rozměrové přesnosti je popsán v kapitole 5.1.

8.2.2 Tvrdost

Průběh měření tvrdosti je popsán v kapitole 5.2.

8.2.3 Drsnost

Průběh měření drsnosti je popsán v kapitole 5.3.

8.2.4 Velikost otřepů a optická kontrola řezné hrany

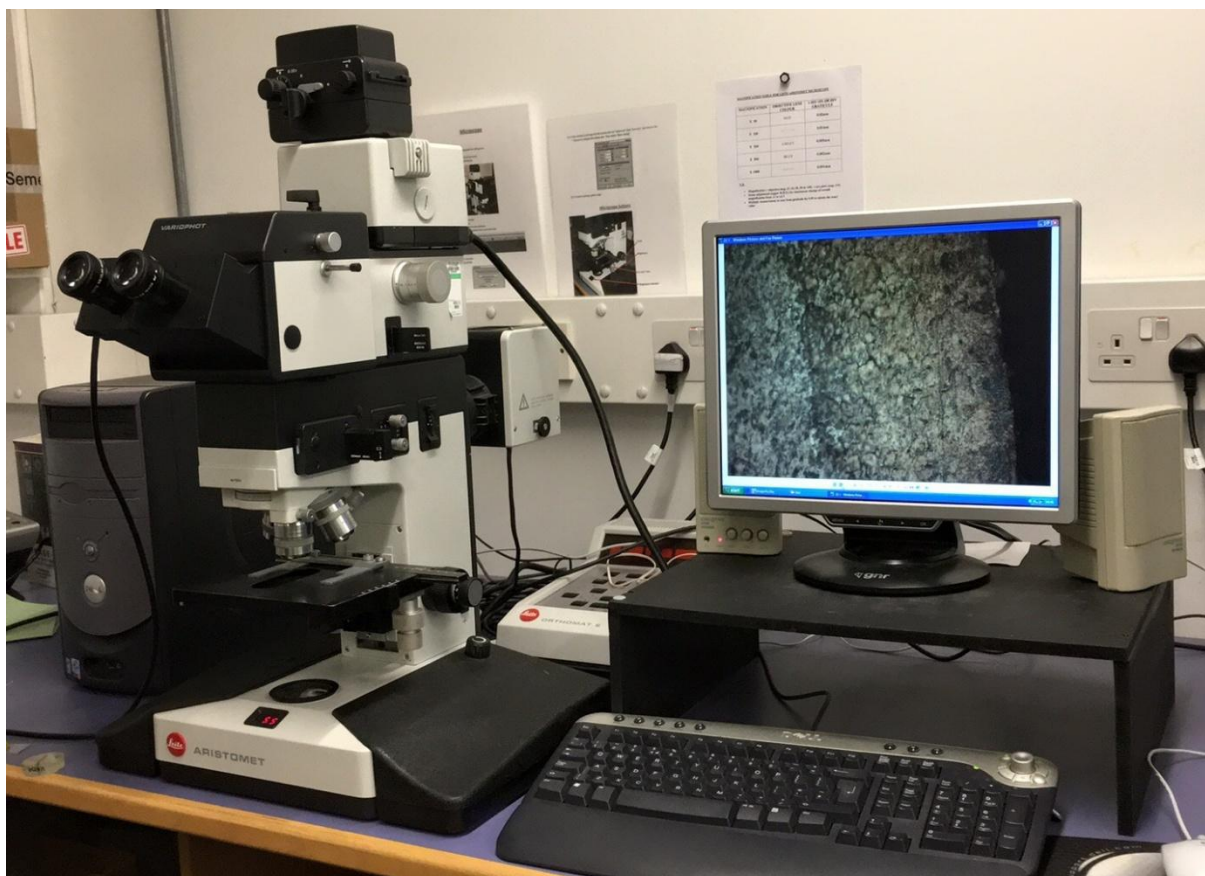
Průběh měření popsán v kapitole 5.4.

8.2.5 Mikrostruktura

Metalografická analýza byla provedena na světelném metalografickém mikroskopu Aristomat v prostorách firmy Mann-Hummel. Pro zjištění mikrostruktury řezného povrchu byly použity již připravené vzorky, které byly použity pro měření tvrdost. Výroba a příprava vzorků je již popsána v kapitole 5.2.

Rozdíl v přípravě vzorků pro sledování mikrostruktury je ten, že vzorky musely být přeleštěny na zařízení Streurs abrazivní pastou s velikostí zrn 3 μ m, povrch tedy dostal lepší strukturu. Další věc, která musela být aplikována, bylo naleptání povrchu tekutinou Nital.

Samotné měření probíhalo na mikroskopu, vzorky byly připevněny lepící pastou na posuvný stůl. A u každého vzorku byla zjištěna mikrostruktura a díky kameře propojené do počítače byl záznam uložen.



Obrázek 35 Metalografický mikroskop Aristomat

8.2.6 Moment a uínací síla potřebné pro řezání závitů

Díky vhodně zvolenému tvaru vzorků, bylo možné vyříznout do díry závit M12x1,75 a změřit moment pro vyrobení tohoto závitu. Pro měření silového zatížení závitníků řezným momentem byl použit čtyř složkový křemíkový piezoelektrický dynamometr Kistler s označením 9272. Celá aparatura pro měření řezných momentů se skládala ze zmíněného dynamometru, z nábojových zesilovačů Kistler 5011, přepínače a stolního počítače, který snímané údaje zaznamenával. Měřicí zařízení je znázorněno na obrázku 35. Díky komunikaci dynamometru s počítačem byly zaznamenány hodnoty momentů a sil v závislosti na čase. Tyto hodnoty byly poté převedeny do programu MS Excel a byly z nich vytvořeny grafy popsané v následující kapitole.



Obrázek 36 Měřicí aparatura

Samotný proces měření momentů a řezání závitů probíhal v laboratoři VUT v Brně na stroji CNC MCV 1210 Tajmac. Pro řezání závitů byl použit závitník od firmy Seco rozměrů M12x1,75 z rychlořezné oceli.

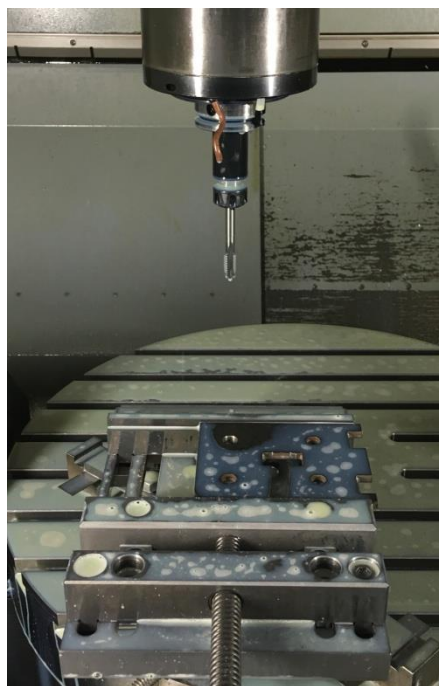


Obrázek 37 CNC stroj pro řezání závitů

Před výrobou závitů bylo důležité zjistit polohu díry, do které se závit bude řezat. Pro tento účel byla použita kulová sonda a funkce CNC stroje. Vystředění bylo provedeno u všech vzorků. Stejně tak samotná výroba závitů.



Obrázek 38 Sonda pro zjištění polohy díry



Obrázek 39 Závitník

8.2.7 Test povrchové úpravy

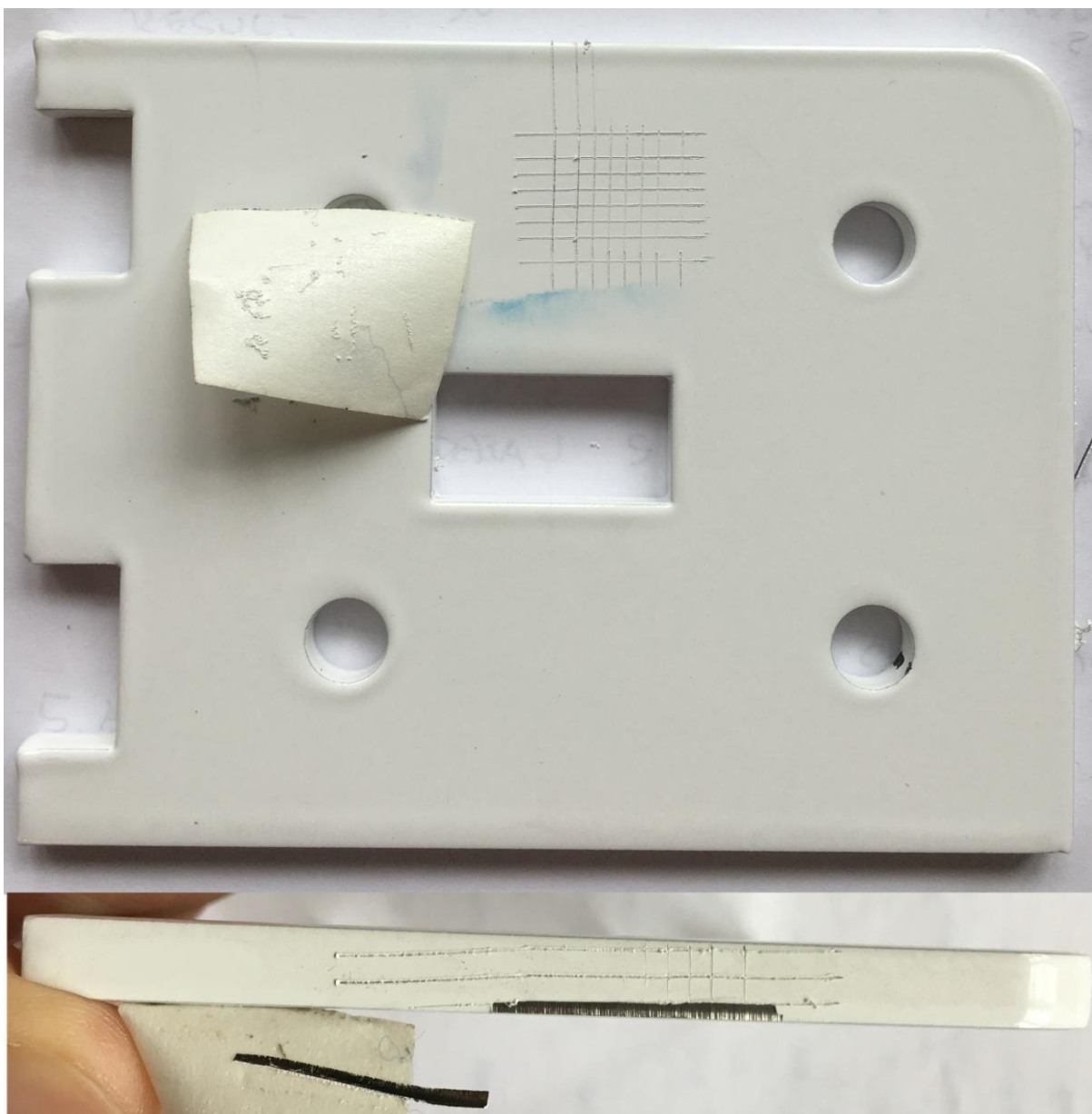
Pro zjištění přilnavosti barvy na površích z různých typů nekonvenčních technologií byly všechny vzorky nalakovány bílou práškovou barvou. Lakování a vyhodnocování přilnavosti probíhalo v prostorách firmy HKD Třebíč.

Na obrázku 39 je znázorněn nástroj, kterým byl proveden vryp vzorku.



Obrázek 40 Nástroj pro narušení povrchové vrstvy

Na obrázku 40 je znázorněn vzorek, na kterém již byl proveden test přilnavosti laku k materiálu.



Obrázek 41 Nalakovaný vzorek po testu

8.3 Vyhodnocení výsledků

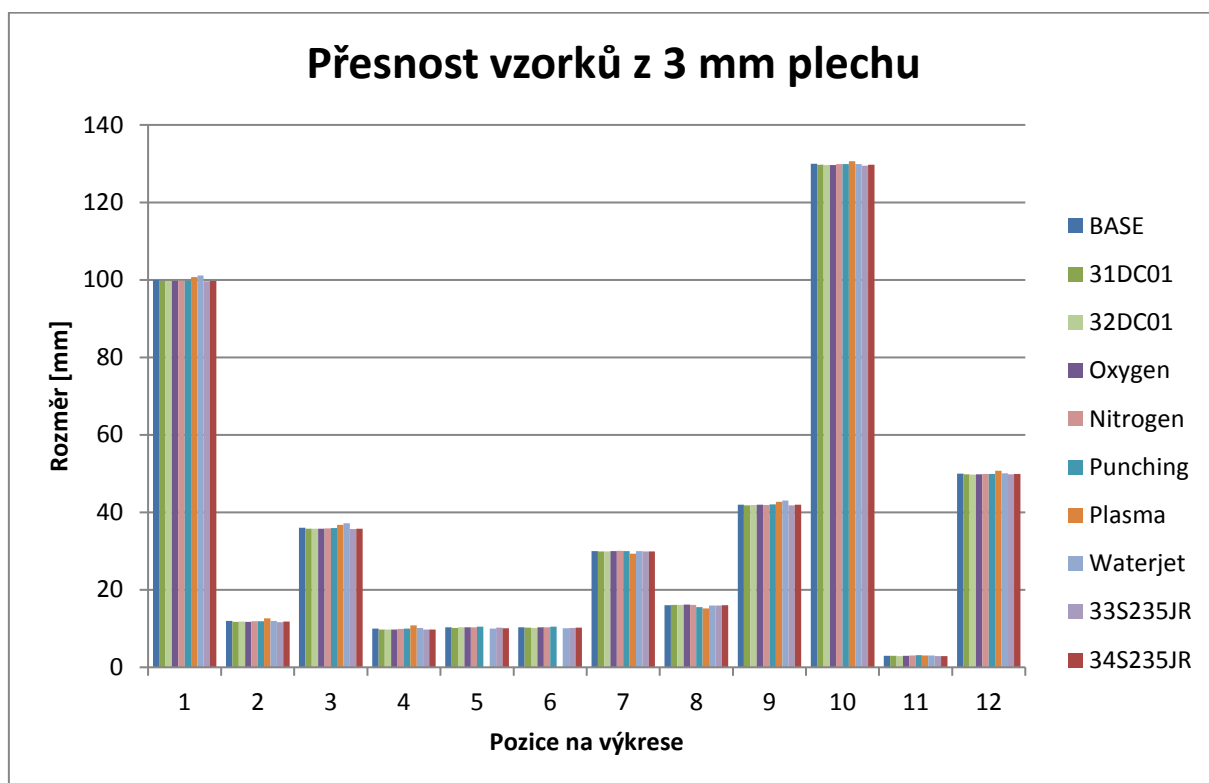
8.3.1 Rozměrová přesnost

A) Vzorky z plechu tloušťky 3 mm

Z tabulky 84 a z grafů 41 (grafické znázornění přesnosti jednotlivých metod dělení materiálu) a grafu 42 (odchylka jednotlivých metod dělení materiálu od požadovaného rozměru) lze vyčíst, že plazmové řezání je nejméně přesná metoda pro dělení materiálu o tloušťce 3 mm. Naopak vzorek značený Oxygen (vypálený na laseru za pomoci kyslíku) je metoda nejpresnější. Rozdíly mezi jednotlivým vzorky jsou velmi nepatrné, jedná se o setiny milimetru, ale nejhorší metoda, tedy plazma se liší od ostatních v řádech desetin milimetru.

Tabulka 84 Záznam přesnosti rozměrů pro plech z 3 mm

	Base	31DC01	32DC01	Oxygen	Nitrog.	Punch.	Plasma	Waterj.	33S235	34S235
1	100	99,74	99,71	99,71	99,84	99,77	100,71	101,11	99,64	99,76
2	12	11,77	11,78	11,75	11,93	11,87	12,63	12	11,64	11,78
3	36	35,75	35,79	35,79	35,85	35,9	36,78	37,22	35,69	35,79
4	10	9,73	9,78	9,72	9,88	10,02	10,82	10,12	9,78	9,78
5	10,3	10,15	10,36	10,3	10,29	10,5		10	10,21	10,08
6	10,3	10,25	10,14	10,31	10,35	10,5		10,05	10,17	10,22
7	30	29,92	29,92	29,98	30,08	29,97	29,32	29,97	29,93	29,91
8	16	16,09	16,09	16,17	16,08	15,51	15,23	15,92	15,97	16
9	42	41,84	41,93	42,01	41,9	42,04	42,71	43,05	41,78	41,94
10	130	129,75	129,66	129,66	129,87	129,89	130,62	129,9	129,51	129,73
11	3	2,97	2,88	2,95	3,04	3,1	3,07	3,05	2,88	2,91
12	50	49,83	49,75	49,82	49,91	49,93	50,71	50,1	49,82	49,88



Graf 41 Přesnost vzorků z 3 mm plechu



Graf 42 Odchylka od základny vzorků z 3 mm plechu

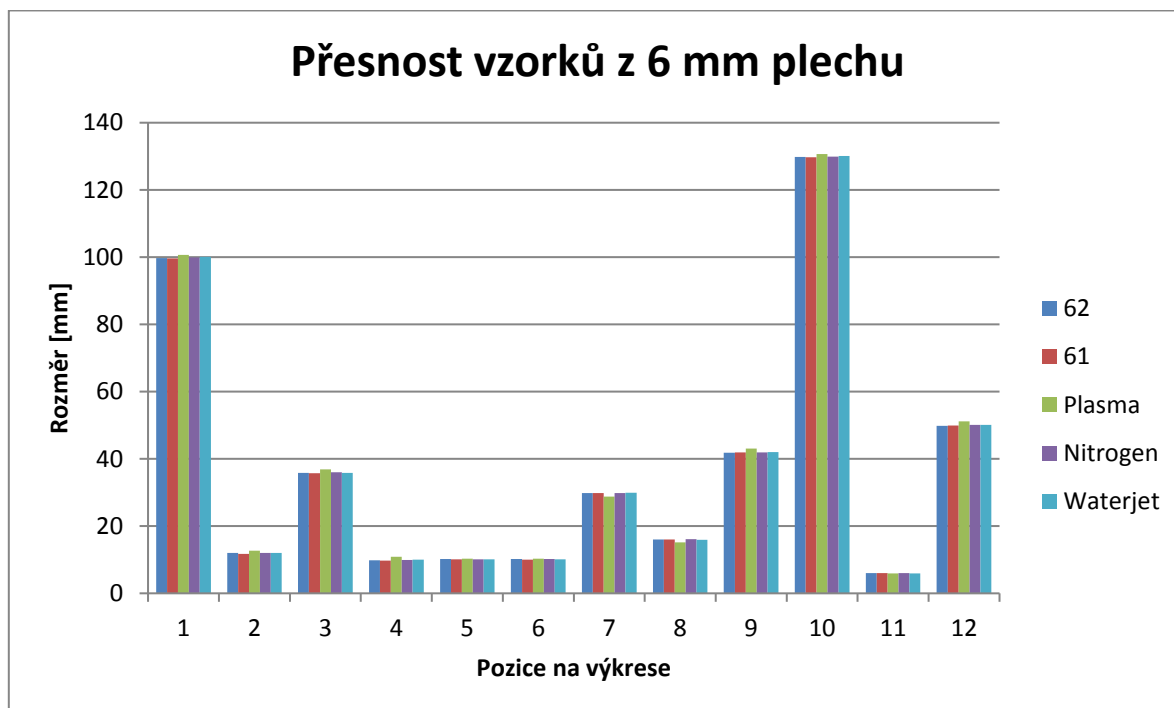
B) Vzorky z plechu tloušťky 6 mm

Tabulka 85 znázorňuje naměřené výsledky přesnosti jednotlivých nekonvenčních metod. Pro grafické znázornění výsledků byly sestaveny grafy 43 a 44. Z těchto porovnávacích metod je patrné, který proces je nejméně přesný pro výrobu z plechu

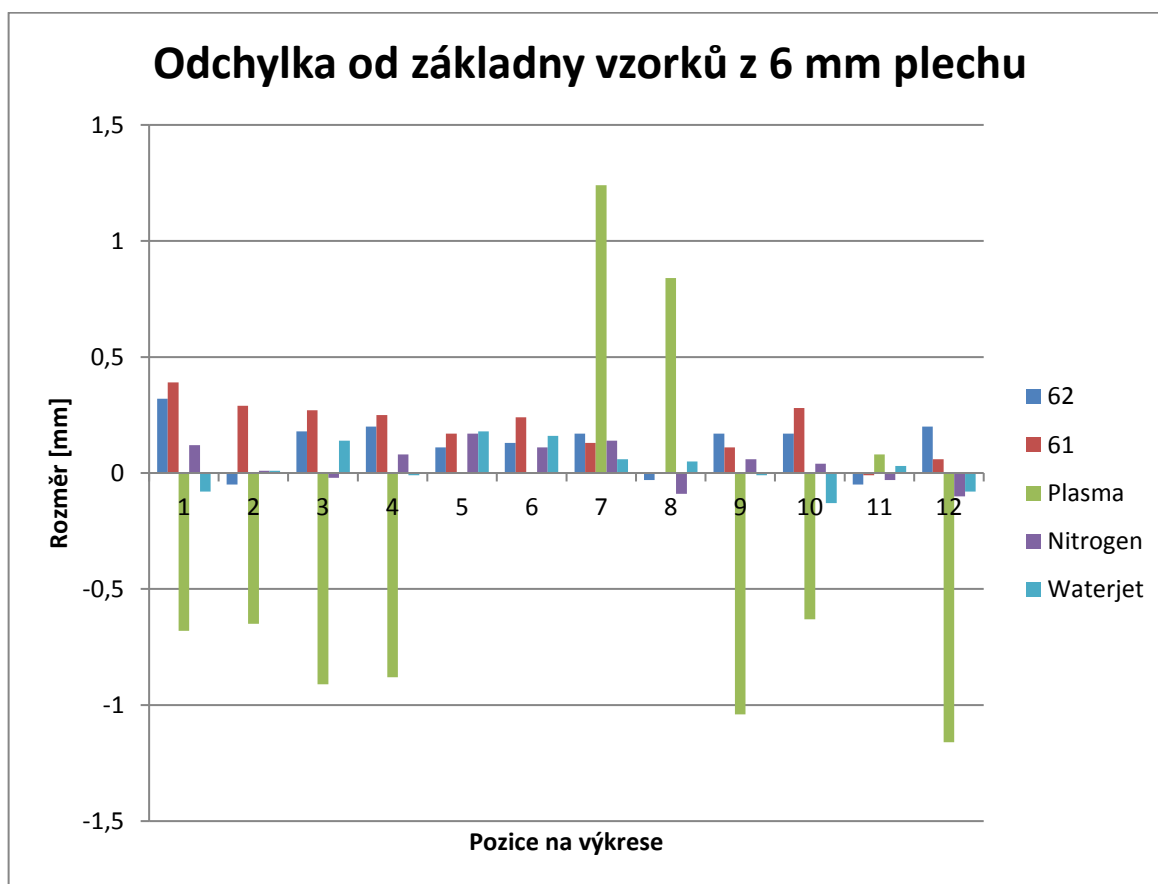
6 mm, jedná se stejně jako pro výrobu z 3 mm plechu o plazmový stroj. Nejpřesnější výrobní metoda je v případě 6 mm plechu vodní paprsek. Opět rozdíl mezi jednotlivými procesy je v řádech setin milimetru, akorát pro vzorek, který byl vyrobený na plazmě, mluvíme o odchylkách v desetinách milimetru.

Tabulka 85 Záznam přesnosti rozměrů pro plech z 6 mm

	Base	62	61	Plasma	Nitrogen	Waterjet
1	100	99,68	99,61	100,68	99,88	100,08
2	12	12,05	11,71	12,65	11,99	11,99
3	36	35,82	35,73	36,91	36,02	35,86
4	10	9,8	9,75	10,88	9,92	10,01
5	10,3	10,19	10,13	10,3	10,13	10,12
6	10,3	10,17	10,06	10,3	10,19	10,14
7	30	29,83	29,87	28,76	29,86	29,94
8	16	16,03	16	15,16	16,09	15,95
9	42	41,83	41,89	43,04	41,94	42,01
10	130	129,83	129,72	130,63	129,96	130,13
11	6	6,05	6,01	5,92	6,03	5,97
12	50	49,8	49,94	51,16	50,1	50,08



Graf 43 Přesnost vzorků z 6 mm plechu



Graf 44 Odchylka od základny vzorků z 6 mm plechu

8.3.2 Tvrdost

A) Vzorky z plechu tloušťky 3 mm

Z naměřených hodnot zapsaných v tabulce 86 byl sestrojen graf 45, který vyobrazuje grafickou závislost tvrdosti u jednotlivých metod nekonvenčních technologií na vzdálenosti od řezné hrany u 3 mm plechu.

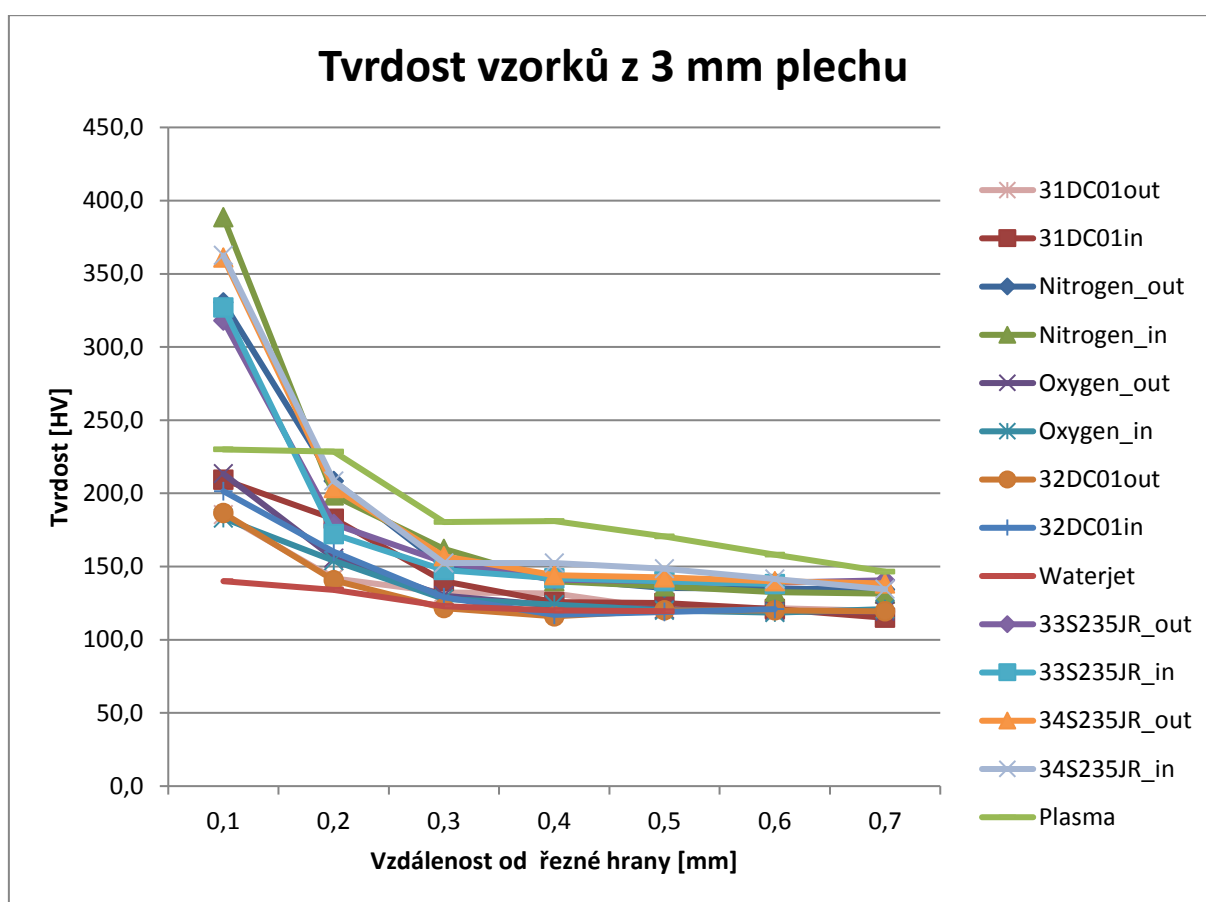
U všech testovaných vzorků z jednotlivých procesů můžeme sledovat velmi podobný průběh zmíněné závislosti. Graf ukazuje, nejvyšší tvrdost na okraji řezné hrany a od vzdálenosti 0,7 mm od řezné hrany se tvrdost vzorků vyrovnává na velmi podobnou konečnou hodnotu kolem 120HV.

Vzorek vyrobený na vláknovém laseru označený jako Nitrogen_3 je nejvíce ovlivněn parametry řezání z pohledu na průběh křivky tvrdosti. Naopak nejmenší ovlivnění tvrdosti vykazuje vzorek vyrobený na vodním paprsku.

Tabulka 86 Přehled tvrdosti HV pro plechy z 3 mm

[mm]	31DC01	Nitrogen	Oxygen	32DC01	Waterjet	33S235JR	34S235JR	Plasma	Punch
0,1	185,3	330,3	213,3	186,5	140	318	361	230	119

0,2	142,0	208,3	155,6	140,5	134	179	203,5	228,5	103
0,3	132,3	150,3	130	121,5	123	153	157	180,5	100
0,4	131,7	141,7	123,3	116	120	141	144	181	100
0,5	121,0	135,3	120,6	120	119,5	140	142,5	170,5	91
0,7	121,7	135,0	119,3	120	120	139	140	158	79
0,9	119,7	134,3	119,3	119,5	117	140,5	138,5	146,5	74.5



Graf 45 Tvrđost vzorků z 3 mm plechu

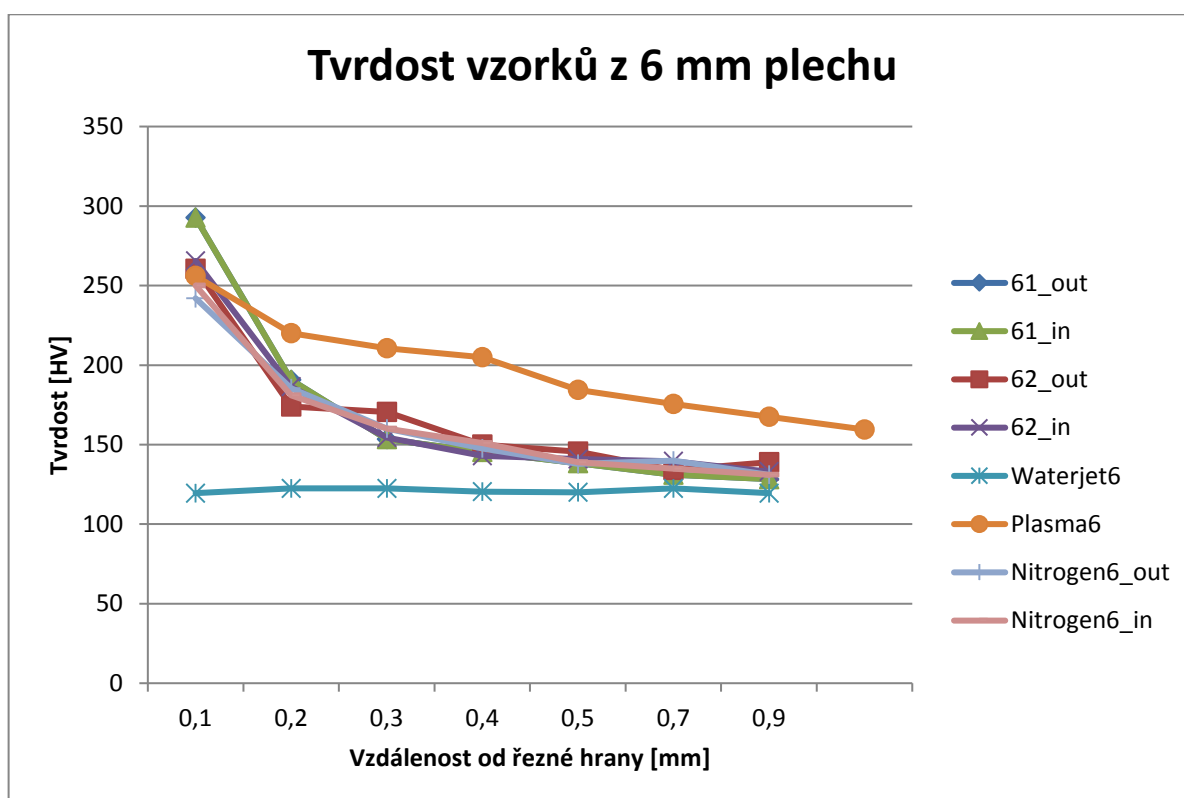
B) Vzorky z plechu tloušťky 6 mm

Tabulka 87 byla sestavena z výsledků měření tvrdosti plechu o 6 mm tloušťce po obrábění pomocí nekonvenčních metod. Pro znázornění grafické závislosti tvrdosti na vzdálenosti od řezné hrany byl sestaven graf 46. Z grafu je patrné, že ovlivnění tvrdosti má podobný průběh pro všechny použité technologie. A od vzdálenosti 0,9 mm od řezné hrany se tvrdost všech vzorků vyrovnává na stejnou finální hodnotu, kterou má neovlivněný materiál.

Nejvíce ovlivněný povrch z hlediska tvrdosti má vzorek značený jako 61 vyrobený na CO₂ laseru. Naopak metoda, která nejméně ovlivňuje tvrdost finálního výrobku je vodní paprsek.

Tabulka 87 Přehled tvrdosti HV pro plechy z 3 mm

[mm]	61	62	Waterjet	Plasma	Nitrogen
0,1	292,6	260,5	119,5	256	242
0,2	190,6	174	122,5	220	185,5
0,3	153,3	170,5	122,5	210,5	160
0,4	145,3	150	120,5	205	147,5
0,5	138,3	145,5	120	184,5	138
0,7	131	134	122,5	175,5	140
0,9	128,3	139	119,5	167,5	131



Graf 46 Tvrdost vzorků z 6 mm plechu

8.3.3 Drsnost

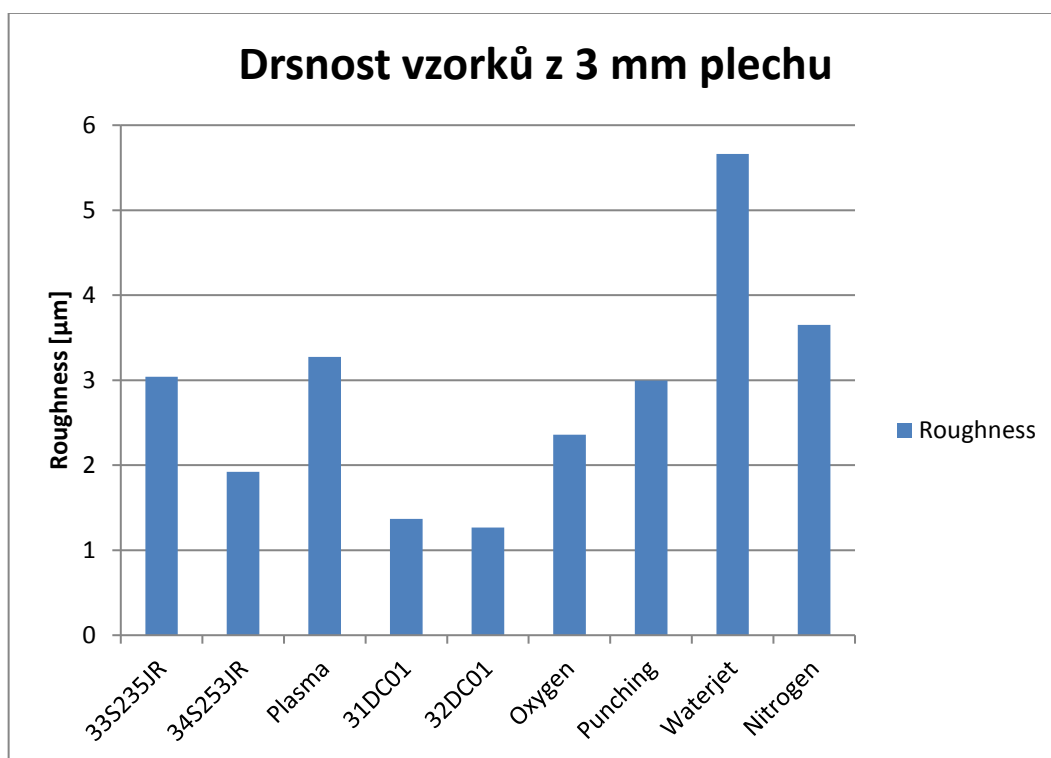
A) Vzorky z plechu tloušťky 3 mm

Další z měřených veličin v experimentu je drsnost řezné hrany vzorku po výrobě vzorku na jedné z nekonvenčních metod obrábění. Výsledky naměřené drsnosti jednotlivých metod pro plech tloušťky 3 mm jsou zapsány v tabulce 88. Pro grafické znázornění byl sestaven graf 47.

Z grafu a tabulky jasně vyplívá, že nejhorší drsnost Ra má vzorek vyrobený na vodním paprsku. Naopak nejlépe si v tomto pohledu stojí vzorečky vyrobené na CO₂ laseru značené jako 32DC01 a 31Dc01.

Tabulka 88 Přehled drsnosti vzorků z 3 mm plechu

	33S235JR	34S253JR	Plasma	31DC01	32DC01	Oxygen	Punching	Waterjet	Nitrogen
1	3,04	1,52	2,69	1,04	1,98	2,28	3,3	5,58	3,04
2	3,55	2,54	2,79	1,52	1,01	2,23	4,06	5,08	3,55
3	2,28	1,01	5,08	1,52	0,81	2,51	2,08	6,09	4,08
4	3,25	2,34	2,54	1,39	1,27	2,41	2,54	5,89	3,93
5	3,3	2,54	3,1	1,45	1,3	2,4	2,61	5,68	3,82
Average	3,084	1,99	3,24	1,384	1,274	2,366	2,918	5,664	3,684



Graf 47 Drsnost vzorků z 3 mm plechu

B) Vzorky z plechu tloušťky 6 mm

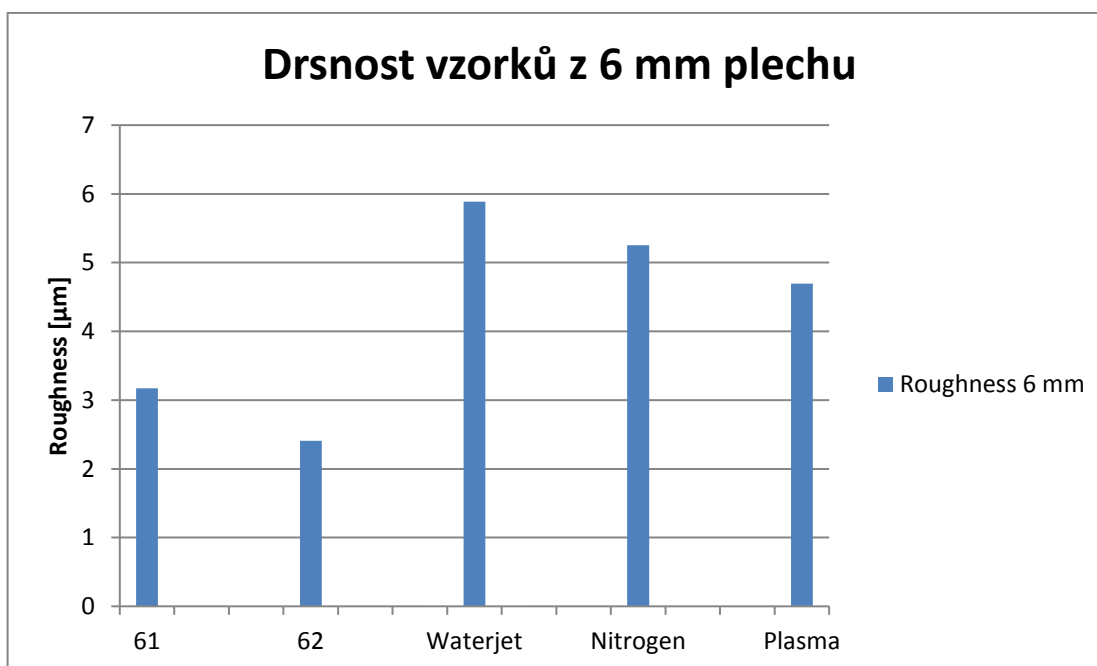
Tabulka 89 zobrazuje naměřené hodnoty drsnosti Ra pro vzorky z plechu tloušťky 6 mm vyrobené na různých metodách nekonvenčního obrábění. Pro snadnější přehled o výsledcích drsnosti byl sestaven graf 48.

Z naměřených a z vyobrazených výsledků je patrné, že nejhorší drsnost povrchu po výrobě má vzorek vyrobený na vodním paprsku. Vzorek vyrobený na CO₂ laseru označený jako 62 má naopak drsnost povrchu nejlepší.

Tabulka 89 Přehled drsnosti vzorků z 6 mm plechu

	61	62	Waterjet	Nitrogen	Plasma
1	2	2	6,09	5,08	5,58
2	3,55	2,05	6,09	6,09	3,3
3	3,55	3,04	6,04	4,52	5,08
4	3,58	2,54	5,33	5,33	4,82
5	3,42	2,67	5,78	5,55	4,73
Average	3,22	2,46	5,866	5,314	4,702

Tabulka 90 Drsnost vzorků z 6 mm plechu



Graf 48 Drsnost vzorků z 6 mm plechu

8.3.4 Velikost otřepů a optická kontrola řezné hrany

Velikost otřepů je ohodnocena v tabulkách 91 a 92. Výsledky v tabulce jsou dle metody popsané v kapitole testování vzorků a není je potřeba blíže komentovat.

A) Vzorky z plechu tloušťky 3 mm

Tabulka 91 Velikost otřepů u vzorků z 3 mm plechu

	Hodnocení otřepu
33S235JR	4
34S253JR	4
Plasma	2
31DC01	4
32DC01	4
Oxygen	4
Punching	4
Waterjet	3
Nitrogen	4

B) Vzorky z plechu tloušťky 6 mm

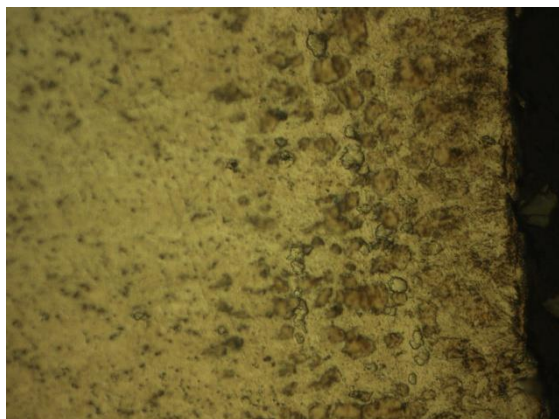
Tabulka 92 Velikost otřepů u vzorků z 6 mm plechu

	Hodnocení otřepu
61	4
62	4
Waterjet	3
Nitrogen	4
Plasma	2

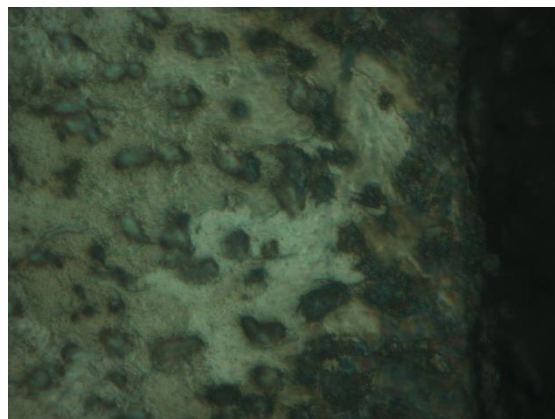
8.3.5 Mikrostruktura

Bohužel výsledky mikrostruktury povrchu po obrábění na různých nekonvenčních metodách jsou špatně čitelné. Detail by byl schopný říct asi jen materiálový specialista. Proto nebudou nijak komentovány a mají spíše informativní charakter. Detailní fotky z mikrostruktury vzorků jsou přiloženy v přílohách 7 – 13.

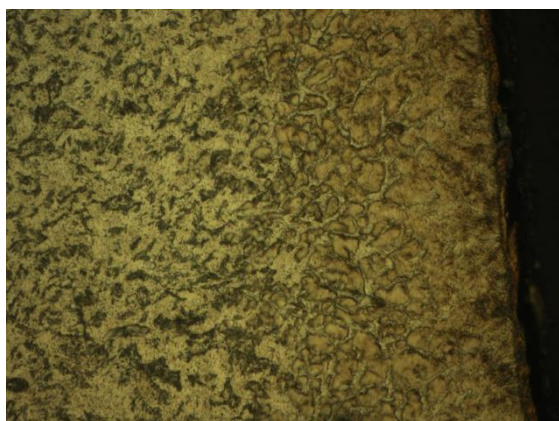
A) Vzorky z plechu tloušťky 3 mm



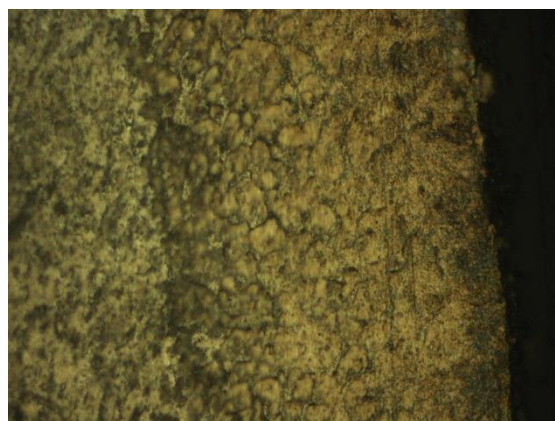
a)



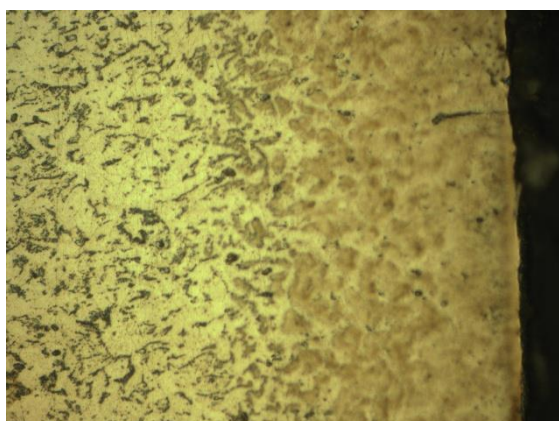
b)



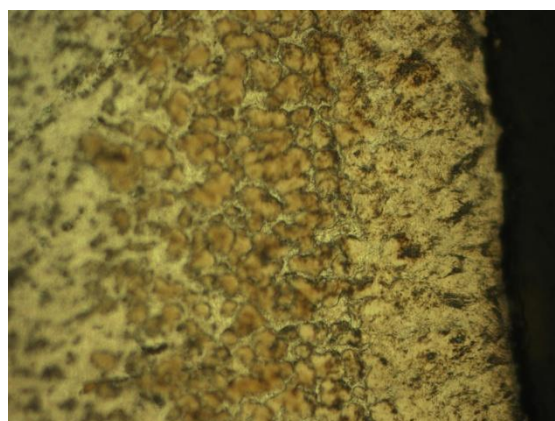
c)



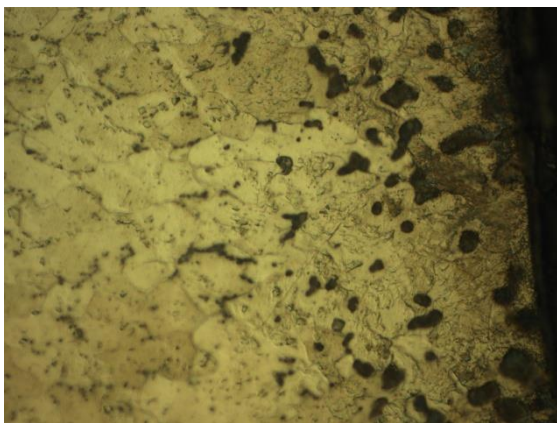
d)



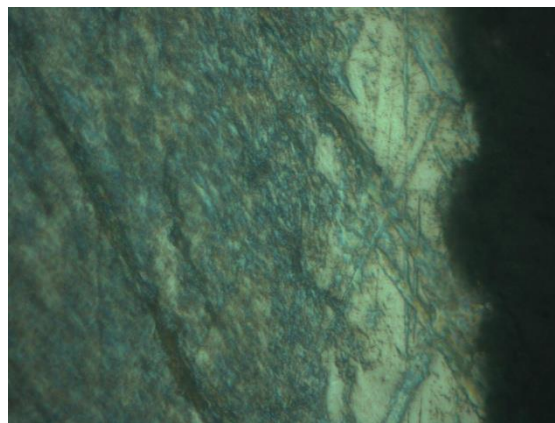
e)



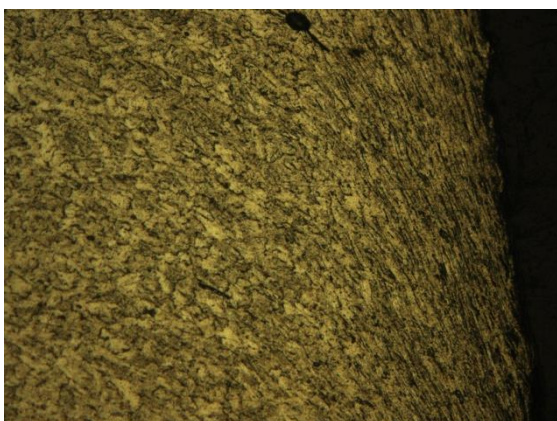
f)



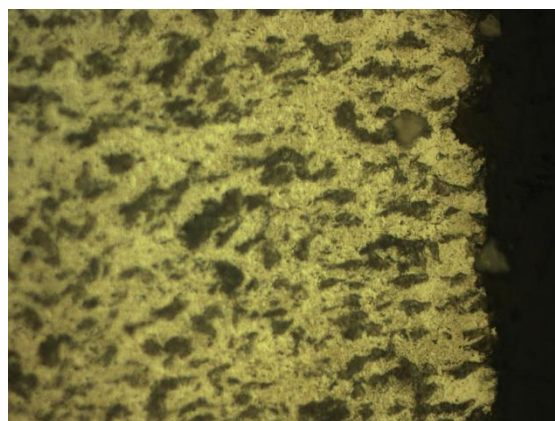
g)



h)



i)



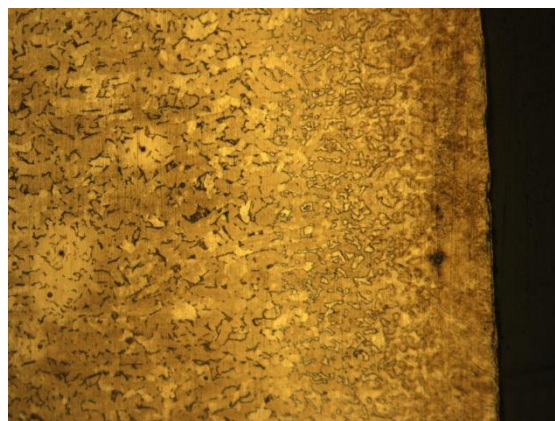
j)

Obrázek 42 Mikrostruktura vzorků z 3mm plechu: a) 31DC01; b) 32DC01; c) 33S235JR; d) 34S235JR; e) 34S235JR_2 f) Nitrogen; g) Oxygen; h) Plasma; i) Punching; j) Waterjet

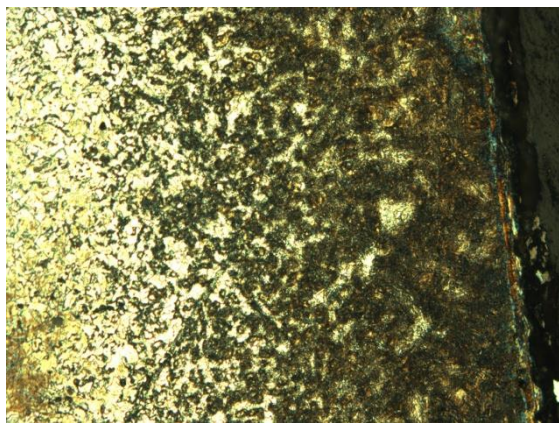
B) Vzorky z plechu tloušťky 6 mm



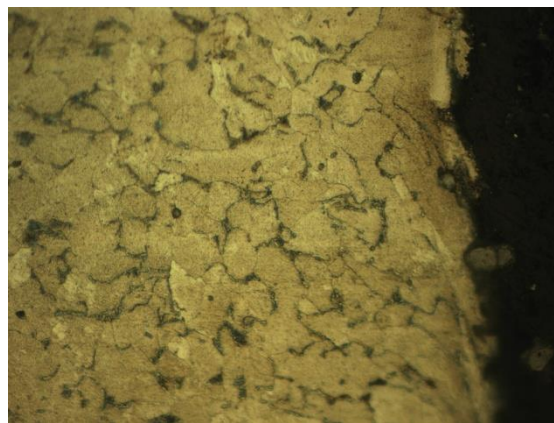
a)



b)



c)



d)

Obrázek 43 Mikrostruktura vzorků z 6mm plechu: a) 61; b) Nitrogen; c) Plasma; d) Waterjet

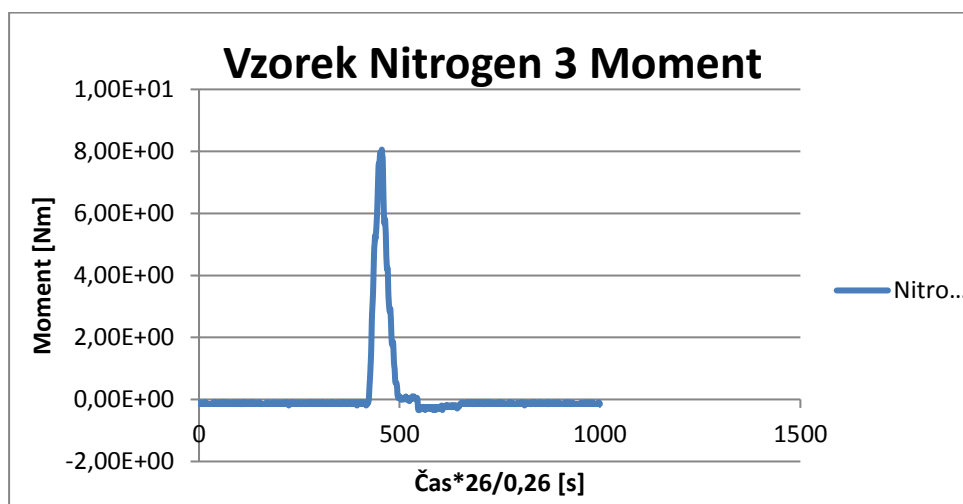
8.3.6 Moment a síla potřebná pro řezání závitů

A) Vzorky z plechu tloušťky 3 mm

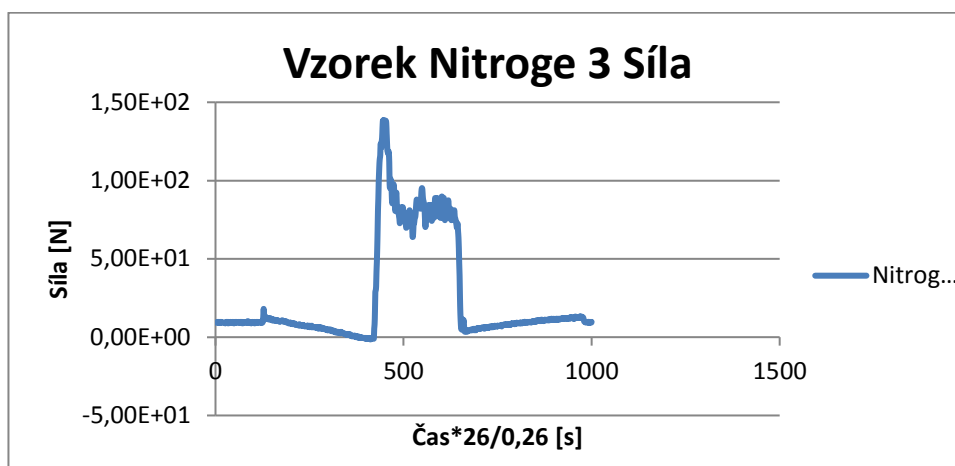
Grafy znázorňující průběh momentu a přítláčné síly potřebné pro vyříznutí závitů do plechu vyrobeného na jednotlivých způsobech nekonvenčních metod byly sestaveny v průběhu experimentální výroby závitů.

Graf 49 znázorňuje průběh momentů a graf 50 znázorňuje průběh přítláčné síly při řezání závitu do vzorku z 3 mm plechu vyrobeného na vláknovém laseru. Ostatní grafické závislosti jsou přiloženy v příloze 14 – 24.

Ze všech grafů byla sestavena tabulka 93 s maximálními hodnotami potřebnými pro výrobu závitů.



Graf 49 Moment potřebný pro vyříznutí závitu u vzorku Nitrogen3



Graf 50 Síla pro vyříznutí závitu u vzorku Nitrogen3

Z tabulky 93 je patrné, že nejmenší moment a přítláčnou sílu vyžadoval vzorek vyrobený na CO₂ laseru značený jako S235JR. Naopak vzorek vyrobený na vláknovém laseru vyžadoval moment a sílu největší.

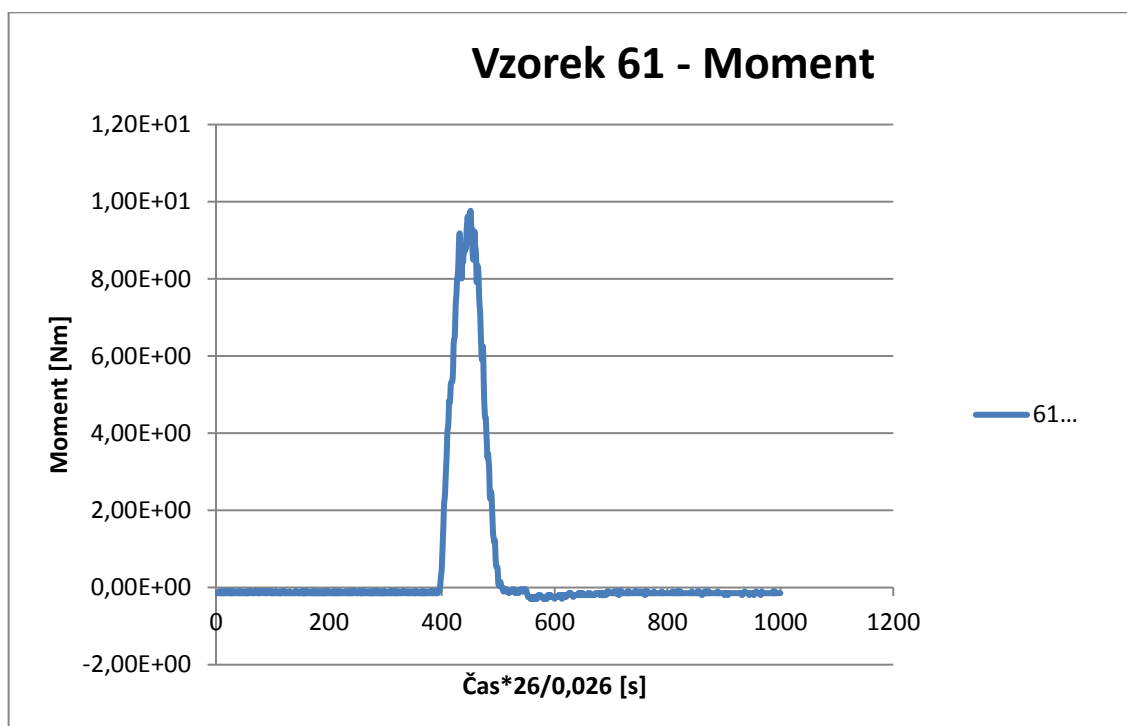
Tabulka 93 Výsledky momentů a sil pro vzorky z plechu 3 mm

	33S23 5	34S23 5	31DC0 1	32DC0 1	OXY.	NITRO.	WAT.	PUN.	PLAS.
MAX FORC E [N]	87,4 3.	85,9 2.	128 7.	111 6.	89,8 4.	139 8.	57,1 1.	106 5.	NA 9.
MAX TORQ UE [Nm]	6,84 2-3.	6,84 2-3.	7,62 4.	8,94 8.	7,76 5.	8,06 6.	8,50 7.	6,20 1.	NA 9.
Result s	2.	1.	6.	7-8.	5.	7-8.	4.	3.	9.

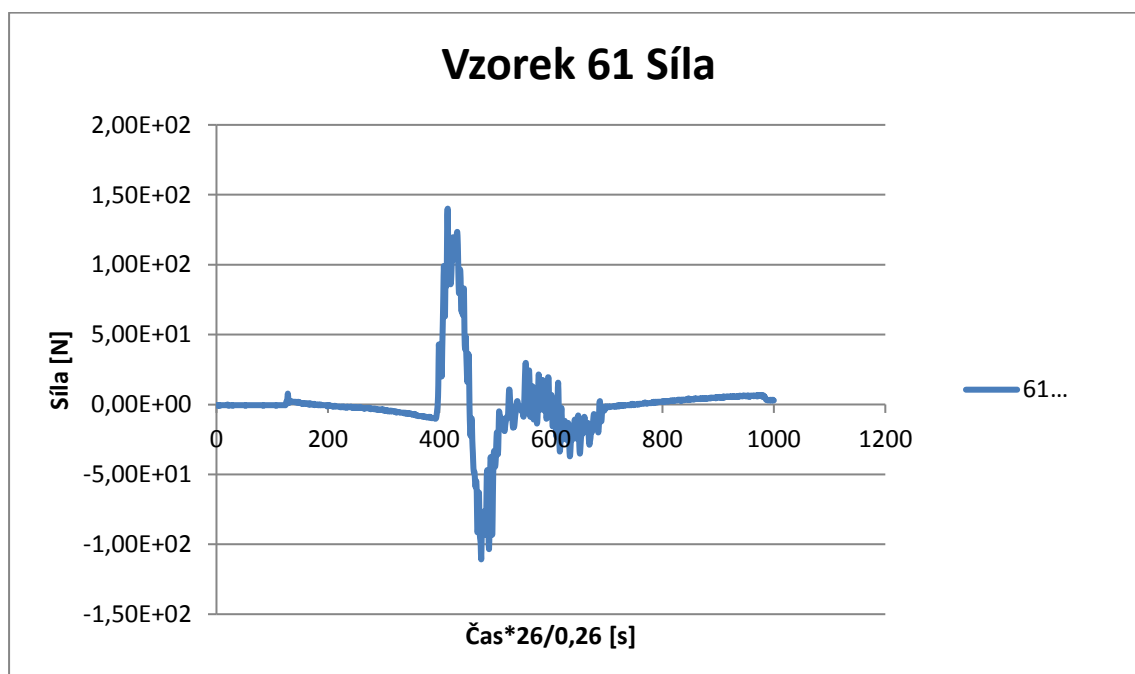
B) Vzorky z plechu tloušťky 6 mm

Z tabulky 94, která byla sestavena z maximálních hodnot momentů a přítláčných sil experimentálně zjištěných při výrobě závitu do vzorků z jednotlivých nekonvenčních metod obrábění.

Z tabulky je patrné, že stroj a nástroj byli nejméně zatížené při vyřezávání závitů do vzorku z vodního paprsku. Naopak největší zatížení při tvorbě závitu vyžadoval vzorek vyrobený na vláknovém laseru.



Graf 51 Moment potřebný pro vyříznutí závitu u vzorku 61



Graf 52 Síla pro vyříznutí závitu u vzorku 61

Tabulka 94 Výsledky momentů a sil pro vzorky z plechu 6 mm

	61	62	NYTROGEN	WATER JET	PLASMA
MAXIMUM FORCE [N]	140 2.	162 3.	192 4.	101 1.	NA 5.
MAXIMUM TORQUE [Nm]	9,77 1.	10,1 3.	9,91 2.	11,7 4.	NA 5.
Result	1.	3-4.	3-4.	2.	5.

8.3.7 Test povrchové úpravy

Výsledky z testu povrchové úpravy nepotřebují také žádný speciální komentář, v tabulkách 95 a 96 je vyobrazené pořadí jednotlivých vzorků. Detailní fotky po testu povrchové úpravy, dle kterých byly vzorky hodnoceny, jsou přiložené v přílohách 25 – 35.

A) Vzorky z plechu tloušťky 3 mm

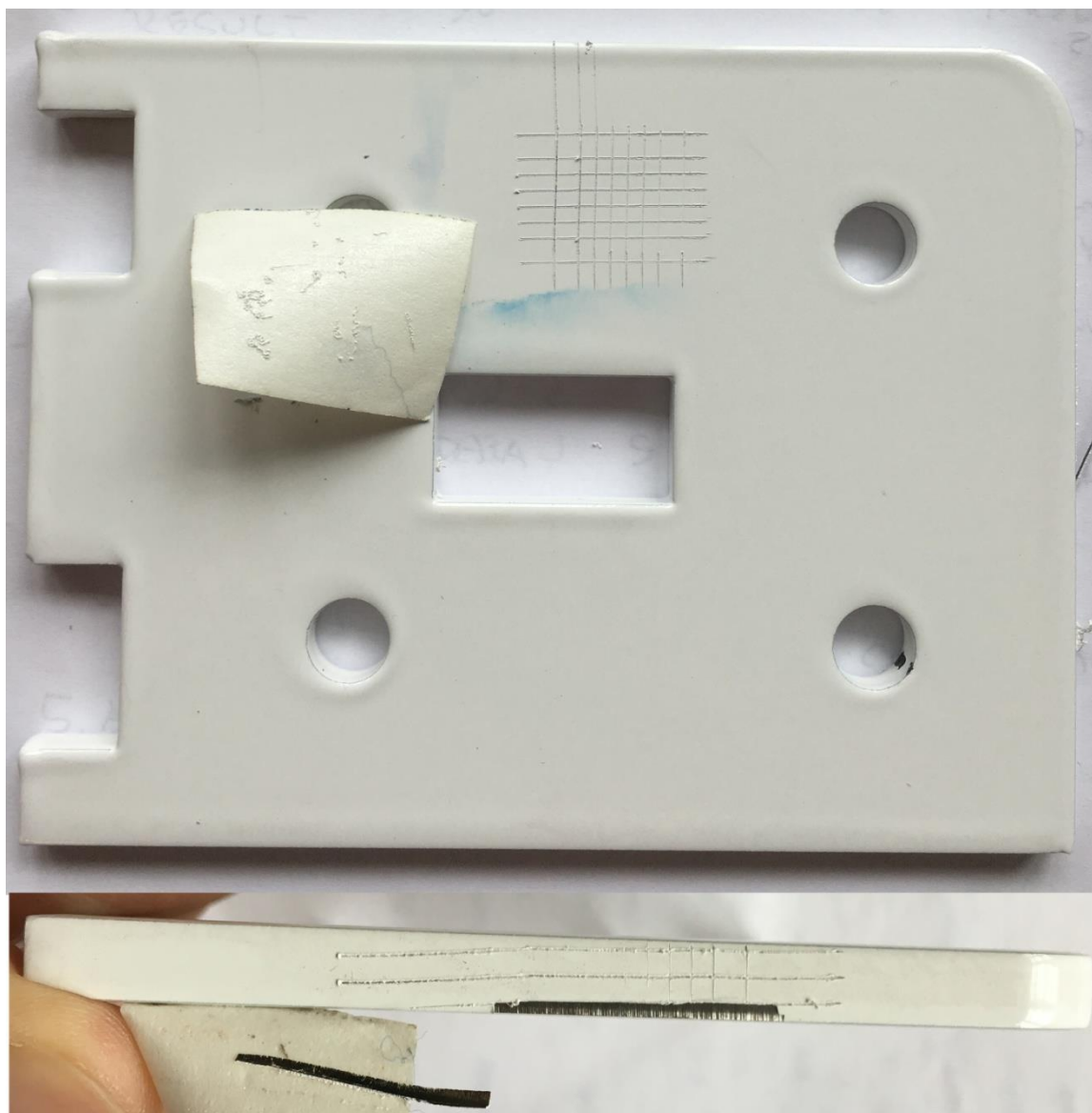
Tabulka 95 Výsledky testu povrchové úpravy pro vzorky z 3 mm plechu

	33S23 5	34S23 5	31DC	32DC	OXYG.	NIT.	WAT.	PUN.	PLAS.
SURF. FIN.	5-6.	5-6.	8.	7.	4.	1-3.	1-3.	1-3.	NA

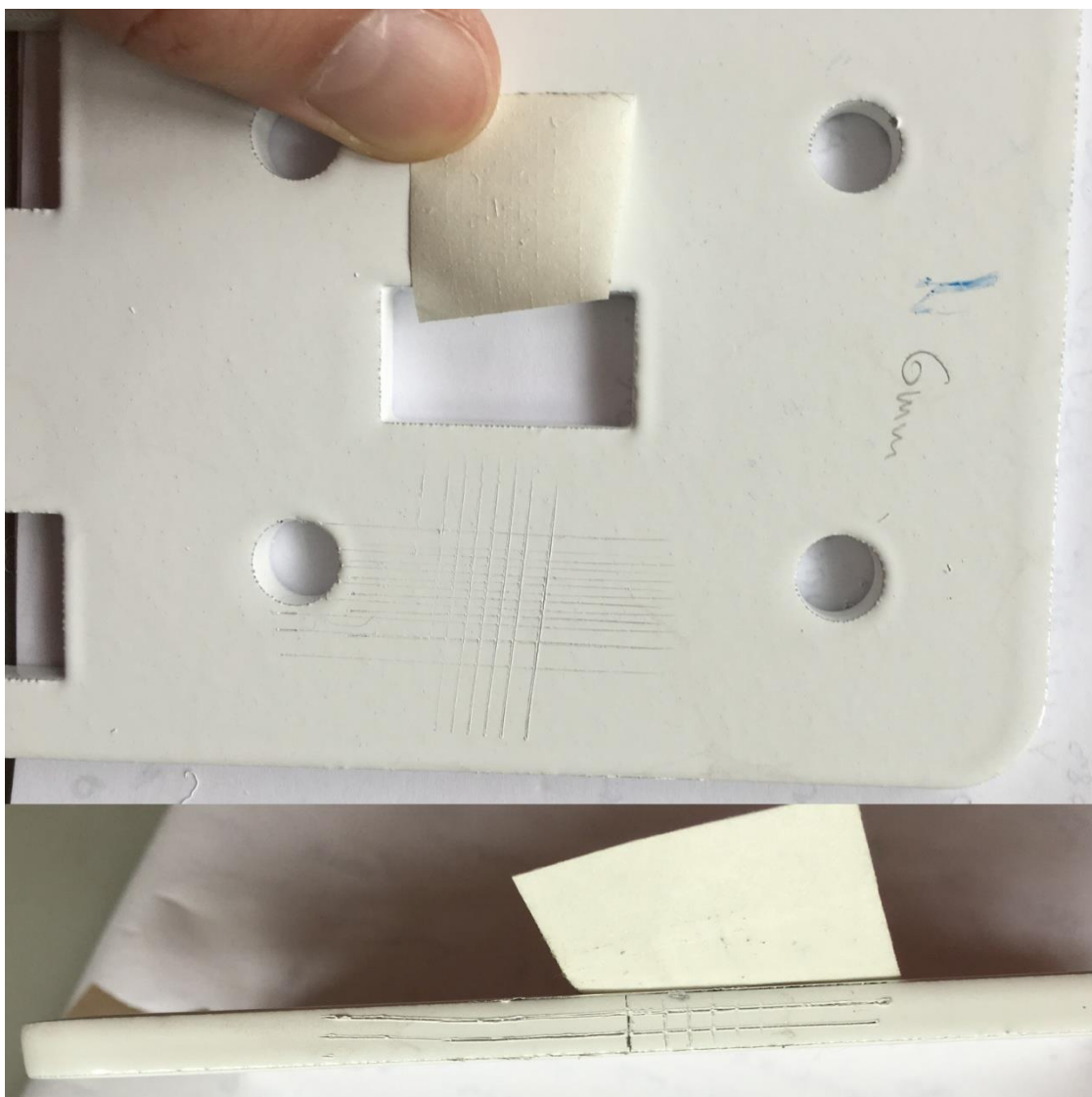
B) Vzorky z plechu tloušťky 6 mm

Tabulka 96 Výsledky testu povrchové úpravy pro vzorky z 6 mm plechu

	61	62	NYTROGEN	WATER JET	PLASMA
SURF. FIN.	3-4.	3-4.	1-2.	1-2.	NA



Obrázek 44 Výsledek testu povrchové úpravy u vzorku 61 - NOK



Obrázek 45 Výsledek testu povrchové úpravy u vzorku Nitrogen6 - OK

9 DOPORUČENÍ PRO HKD TŘEBÍČ

Tabulka 97 Přehled výsledků pro plech o tloušťce 3 mm

	33S235JR	34S235JR	31DC01	32DC01	OXYGEN	NITROGEN	WATER JET	PUNCH	PLASMA
AVERAGE ACCURACY [mm]	0,215 7.	0,151 6.	0,150 4-5.	0,150 4-5.	0,119 3.	0,048 1.	-0,240 8.	0,050 2.	0,65 9.
MAXIMUM HARDNESS [HV]	318 7.	361 9.	185 2.	186 3.	213 4.	330 8.	140 1.	230 5-6.	230 5-6.
AVERAGE ROUGHNESS [m]	3,084 6.	1,99 3.	1,384 2.	1,274 1.	2,366 4.	3,684 8.	5,664 9.	2,918 5.	3,24 7.
MIC. STRUC.	No result	No result	No result	No result	No result	No result	No result	No result	No result
MAXIMUM FORCE [N]	87,4 3.	85,9 2.	128 7.	111 6.	89,8 4.	139 8.	57,1 1.	106 5.	NA 9.
MAXIMUM TORQUE [Nm]	6,84 2-3.	6,84 2-3.	7,62 4.	8,94 8.	7,76 5.	8,06 6.	8,50 7.	6,20 1.	NA 9.
SURF. FIN.	5-6.	5-6.	8.	7.	4.	1-3.	1-3.	1-3.	NA
Result	30/6=5 7.	27/6=4,5 3-5.	27/6=4,5 3-5.	29/6=4,83 6.	24/6=4 2.	32/6=5,33 8.	27/6=4,5 3-5.	19/6=3,16 1.	39/5=7,8 9.

Pro vyhodnocení části experimentu, kde byly porovnávány metody nekonvenčního obrábění, tedy laserové řezání, řezání plazmou, řezání vodním paprskem a vysekávání na vysekávacím lisu byla vyhotovena tabulka 97. V této tabulce jsou výsledky ze všech měření provedených v experimentu pro všechny použité výrobní metody.

Poslední řádek v tabulce 97 vyhodnocuje vhodnost použití jednotlivých metod pro zpracování oceli tloušťky 3 mm. Dle výsledků v tabulce je vyhodnocen vysekávací lis jako stroj, který má nejpříznivější vliv na materiál. Naopak vodní paprsek a parametry laseru nastavené pro výrobu vzorků 34S235JR a 31DC01.

Tabulka 98 Přehled výsledků pro plech o tloušťce 6 mm

	61	62	NYTROGEN	WATER JET	PLASMA
AVERAGE ACCURACY [mm]	0,181 4.	0,126 3.	0,040 2.	0,026 1.	0,811 5.
MAXIMUM HARDNESS [HV]	292 5.	260 4.	242 2.	120 1.	256 3.
AVERAGE ROUGHNESS [m]	3,22 2.	2,46 1.	5,314 4.	5,866 5.	4,702 3.
MIC. STRUC.	No result	No result	No result	No result	No result
MAXIMUM FORCE [N]	140 2.	162 3.	192 4.	101 1.	NA 5.
MAXIMUM TORQUE [Nm]	9,77 1.	10,1 3.	9,91 2.	11,7 4.	NA 5.
SURF. FIN.	3-4.	3-4.	1-2.	1-2.	NA
Result	17/6=2,83 3-4.	17/6=2,83 3-4.	15/6=2,5 2.	12/6=2 1.	21/5=4,2 5.

Pro vyhodnocení experimentu porovnání nekonvenčních metod obrábění pro ocel tloušťky 6 mm byla navržena tabulka 98. Jako nejlepší metoda, která má nejpříznivější vliv na materiál, se po vyhodnocení experimentu jeví vodní paprsek. Naopak metoda s nejhorším vlivem na materiál je řezání plazmou.

ZÁVĚR

Vypracovaná diplomová práce byla rozdělena do tří základních částí. První je teoretický popis nekonvenčních metod obrábění, tedy metod, které byly použity při výrobě experimentálních vzorků. Převážná část teorie je zaměřena na laserové řezání, kterému byla věnována druhá část ze tří částí práce.

Jak již bylo zmíněno, druhá část práce se věnovala experimentálnímu odzkoušení parametru CO₂ laseru Amada a jejich vliv na materiály běžně používané při výrobě ve firmě HKD Třebíč. Testované materiály byly následující: DC01, S235JR, C45, EN X5CrNi18-10 a AlMg3. Pro experiment byly použity tloušťky plechu 3 mm a 6 mm, které jsou nejběžněji používané firmou HKD Třebíč.

- Pro materiál DC01 byly vybrány jako nejvhodnější parametry nastavení laserového troje, parametry použité u vzorku značeného jako 32DC01 pro 3 mm plech a značeného jako 62DC01 pro 6 mm plech.
- Experiment ověřil, že nastavení parametrů u vzorku 32S235JR pro 3 mm plech a 62S235JR pro 6 mm plech jsou z kvalitativního hlediska ty nejvhodnější pro řezání z materiálu S235JR.
- Nejvhodnější parametry laserového řezání pro materiál C45 byly použity u vzorků 31C45 a 32C45 pro plech tloušťky 3 mm. Oba tyto vzorky vyšli velmi podobně z kvalitativního hlediska. Pro plech tloušťky 6 mm stejné jakosti byly nejlépe vyhodnoceny parametry nastavení stroje u vzorku 62C45.
- Pro plech tloušťky 3 mm jakosti EN X5CrNi18-10 je nejvhodnější použít stejného nastavení laseru, jako bylo provedeno při experimentu u vzorku značeného 32Ner. Pro plech tloušťky 6 mm stejné jakosti nebyly vybrány jedny nejvhodnější parametry stroje, ale dva vzorky měly výsledky velmi podobné. Proto bylo navrženo použít stejné parametry nastavení stroje, jak bylo provedeno u vzorků značených 61Ner nebo 62Ner.
- Pro plech jakosti AlMg3 tloušťky 3 mm byly jako nejvhodnější zvoleny parametry použité při výrobě vzorku 31Al. Pro plech 6 mm je možná volba mezi dvěma nastaveními a to parametry u vzorku 61Al nebo u vzorku 62Al.

Poslední část diplomové práce se věnovala experimentálnímu porovnání nekonvenčních metod obrábění. Doporučení pro firmu HKD Třebíč, která plánuje v blízké době pořídit nový stroj pro zpracování plechů je následující:

- Z hlediska kvality a následného zpracování materiálu po řezání je jako nejlepší volba pro ocelové plechy tloušťky 3 mm pořídit vysekávací lis.
- Pro ocelové plechy tloušťky 6 mm je z hlediska kvality řezu a následnému zpracování nejvhodnější pořídit vodní paprsek.

Výsledky diplomové práce byly s úspěchem prezentovány majitelům firmy HKD Třebíč, kteří jistě zváží výsledky v práci při pořízení nové technologie pro zpracování plechů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BARCAL, Jaroslav. *Nekonvenční metody obrábění*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1989, 122 s.
2. Lasery-historie. ČVUT. Ústav Fyziky [online].
3. MSPlaser, 2016, *Laser cutting* [online]. [image]. 2016. [Accessed 5 April 2016]. Available from: <http://www.msplaser.com/wp-content/uploads/2014/12/laser-cutter-cutting-metal.jpeg>
4. Prostordesign, 2016, *Punching machine* [online]. [image]. 2016. [Accessed 1 May 2016]. Available from: <http://www.prostor-design.cz/en/wp-content/uploads/sites/1/nggallery/derovani/1550.jpg>
5. Microstep, 2016, *Water jet* [online]. [image]. 2016. [Accessed 5 April 2016]. Available from: http://www.microstep.eu/news/kjellbergs_smart_focus_technology_for_plasma_cutting_integrated_by_microstep/
6. Itmmechanicalservices, 2016, [online]. [image]. 2016. [Accessed 5 April 2016]. Available from: http://www.itmmechanicalservices.com/uploads/4/6/7/9/46794571/6669226_orig.jpg
7. Hecht, Jeff, 1992, *The laser guidebook*. Blue Ridge Summit, PA : TAB Books.
8. Groover, Mikell P, 2012, *Introduction to manufacturing processes*. Hoboken, NJ : Wiley.
9. Ruby Laser - Laser: The Ultimate Flashlight. UCDavis Chemwiki [online]. [© 2015] [cit. 2015-02-05]. Dostupné z: http://chemwiki.ucdavis.edu/Wikitexts/UC_Davis/UCD_Chem_2A/UCD_Chem_2A%3A_Hayashi/Unit_IV%3A_Electronic_Structure_and_Bonding/07%3A_Electrons_in_Atoms/Laser%3A_The_Ultimate_Flashlight
10. NOVÁK, Miroslav. Seriál na téma lasery: Základní princip laseru a jejich dělení. Lasery a Optika [online]. 15.3.2011 [vid. 2015-03-22]. Dostupné z :<http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-ajejichdeleni-127>
11. ŠULC, Jan. *Lasery a jejich aplikace*. [online]. 8.10.2002 [cit. 2015-03-08]. Dostupné z: <http://www.plslaser.cz/pdf/lasery.pdf>

12. KOŘÁN, Pavel. Lao Lasery a optika. Seriál na téma lasery [online]. Praha, 20.05.2011 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery>
13. MRŇA, Libor. *Základy laserové technologie* [online]. Brno, 2013 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody__svarovani__zaklady_laserove_techiky_2013__mrna.pdf.
14. Leonardo technology. *Lasery info learnig* [online]. Hlohovec, 2005 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/cs/znaceni-laserem-solaris/lasery-info-learning?start=1>.
15. ŘASA, Jaroslav a KEREČANINOVÁ, Zuzana. Nekonvenční metody obrábění – 4.díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008 [cit. 2015-03-18]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html>
16. Shulika, Oleksiy and Sukhoivanov, Igor A, [no date], *Advanced lasers*.
17. Kalivoda, M and Osička, K, 2012, *Nekonvenční technologie obrábění*. [online]. 1. Brno. [Accessed 30 February 2016]. Available from: <http://opus.fme.vutbr.cz/dokumenty/moduly/Osicka.pdf>
18. Technical information: Laser processing: CO2 laser, 2007. [online], 1. Ditzingen.
19. He, Apple, 2015, *Working Principles of the CO2 laser* [online]. [image]. 2015. [Accessed 15 February 2016]. Available from: https://media.licdn.com/mp/MP/shrinknp_800_800/AAEAAQAAAAAAAAAAQcAAAAJGZhZjY2NmRkLWlwMGUtNDg4Zi1iNmI3LTgxMTk5YWUyNmY2Ng.png
20. *Handbook of laser welding technologies*, 2013. [online], 1. Philadelphia, : Woodhead Pub.
21. *Nd-YAG-laser*, [no date]. [online], [image].
22. Leone, C., Genna, S. and Tagliaferri, V., 2014, Fibre laser cutting of CFRP thin sheets by multi-passes scan technique. *Optics and Lasers in Engineering*. 2014. Vol. 53, p. 43-50. DOI 10.1016/j.optlaseng.2013.07.027. Elsevier BV
23. Zajac, A., Dorosz, D., Kochanowicz, M., Skórczakowski, M. and Świdorski, J., 2010, Fibre lasers - conditioning constructional and technological. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*. 2010. Vol. 58, no. 4. DOI 10.2478/v10175-010-0048-9. Walter de Gruyter GmbH

24. Herz, Filipe, 2011, *Schematic diagram of cladding-pumped double-clad fiber laser* [online]. [image]. 2011. [Accessed 23 February 2016]. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Double-clad_fiber#/media/File:Schematic_diagram_of_high_power_fiber_laser_using_a_double-clad_fiber.svg
25. Sun, Haiyin, 2012, *Laser diode beam basics, manipulations and characterizations*. ordrecht : Springer.
26. *Diode laser principle*, 2013. [online], [image].
27. Pandey, A and Dubey, A, 2012, Simultaneous optimization of multiple quality characteristics in laser cutting of titanium alloys. *Elsevier*. 2012.
28. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie: Advanced methods of material removal*. 1. vyd. Košice: Viena, 2000.
29. Pevnolátkové lasery - TRUMPF Česká Republika, 2016. *Cz.trumpf.com* [online],
30. Mrna, Libor, 2013, [online]. 1. Brno. [Accessed 24 February 2016]. Available from: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv___specialni_metody_svarovani___rezani_laserem_2013___mrna.pdf
31. Technical information: Laser processing: CO2 laser, 2007. [online], 1. Ditzingen.
32. CARISTAN, Charles L. *Laser cutting guide for manufacturing*. 1th ed. Michigan: SME, 2004.
33. Amada, 2011, *Cutting Know-how for Amada lasers* [online]. 1. Schaumburg. Accessed 24 February 2016]. Available from: <https://www.google.co.uk/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUK EwiL156hlqfMAhXpBcAKHeh4DpoQFggcMAA&url=http%3A%2F%2Ffiles.engineering.com%2Fdownload.aspx%3Ffolder%3D66102df5-f5b1-4aa6-a700-1f7e2b6fd719%26file%3Dknowhow1.pdf&usg=AFQjCNElopT8dStpjHO4RQ4XqK4XadyJ0Q&bvm=bv.119745492,d.ZGg&cad=rja>
34. BYSTRONIC LASER AG. *Laser: Technologie řezání*. 2007.
35. ITM Mechanical Services, [no date], [online]. [image]. [Accessed 30 March 2016]. Available from: http://www.itmmechanicalservices.com/uploads/4/6/7/9/46794571/6669226_orig.jpg

36. Davim, J. Paulo, 2011, *Modern machining technology*. Oxford : Woodhead Pub.
37. Chinawaterjets, 2016, *Water jet cutting* [online]. [image]. 2016. [Accessed 6 February 2016]. Available from: <http://www.chinawaterjets.com/UpFiles/20140802163947.gif>
38. Semiatin, S. L, 2006, *Metalworking*. Materials, Park, Ohio : ASM International.
39. Epigon, 2010, [online]. [image]. 2010. [Accessed 16 February 2016]. Available from: <http://www.epigon.cz/katalog-obrazku/clanek-34/detail-obrazek-1.jpg>
40. Finda, A and Fantuf, L, 2011, Průmyslové spektrum: Děrování s přidanou hodnotou. *Prumyslove spectrum* [online]. 2011. [Accessed 2 February 2016]. Available from: <http://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-strihani.html>
41. Tsch tsch, Heinz, 2006, *Metal forming practise*. Berlin : Springer-Verlag.
42. Semiatin, S. L, 2006, *Metalworking*. Materials, Park, Ohio : ASM International.
43. ProQUes, 1994, Plasma cutting. *ProQues* [online]. 1994. [Accessed 9 February 2016]. Available from: <https://www-nexis-com.ezproxy.napier.ac.uk/search/UrlApiShowSearch.do?shr=t&secondRedirectIndicator=true&sfi=GB00NBGenSrch&csi=7964&rand=0.8466109756136891>
44. Aton, A, 2011, *Plasma Cutters operations* [online]. [image]. 2011. [Accessed 14 February 2016]. Available from: http://4.bp.blogspot.com/-ivkHGoDSppA/TI_MHkFsyLI/AAAAAAAAAGOY/aihMHajGo8M/s1600/plasmacutter.gif
45. Iosub, A., Nagit, Gh. and Negoescu, F., 2008, Plasma Cutting of Composite Materials. 74 *International Journal of Material Forming*. 2008. Vol. 1, no. S1, p. 1347-1350. DOI 10.1007/s12289-008-0113-1. Springer Science + Business Media
46. KEREČANINOVÁ a Jaroslav ŘASA. *Nekonvenční metody obrábění - 5. díl* [online]. MM Průmyslové spektrum, 2008 [cit. 2015-03-30]. ISSN 080504. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-5-dil.html>
47. KUSALA, Jaroslav. Aplikace laserů: Další oblasti. *Lasery kolem nás* [online]. 2004 [cit. 2015-03-31]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k34.htm>
48. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. 1. vyd. Košice: Viena, 2000, 275 s. ISBN 80-709-9430-4.

49. BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. *Laserové technológie*. 1. vyd. Bratislava: STU v Bratislave, 2000, 122 s. ISBN 80-227-1425-9.
50. RÜTERING, Marus. Co rozhoduje při volbě typu laseru. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2011 [vid. 2014-05-08]. Dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/co-rozhoduje-pri-volbe-typulaseru.html>>.
51. MANOHAR, Murali. CO2 laser beam cutting of steel: Material Issues. *Journal of laser applications* [online]. May 2006, roč. 18, č. 2, s. 12 [vid. 2014-05-08]. Dostupné z: <www.arcelormittalna.com/plateinformation/documents/en/Inlandflats/>
52. BYSTRONIC LASER AG. *Laser: Technologie řezání*. 2007.
53. BERKMANN, Joachim a Mark FAERBER. LINDE GAS. *Facts about laser technology: Laser cutting*. Höllriegelskreuth (Germany). Dostupné z: <[http://www.laserdeal.com/techInfoFiles/Facts%20about%20Laser%20Cutting%20engl\[1\].%20Drucklayout%2023.06.03.pdf](http://www.laserdeal.com/techInfoFiles/Facts%20about%20Laser%20Cutting%20engl[1].%20Drucklayout%2023.06.03.pdf)>.
54. Laserové řezání zlata a stříbra. CIESSETRADE, s.r.o. *Ciessetrade* [online]. © 2014 [vid. 2014-05-23]. D
55. HKD Trebic, 2016, *Material atest*. 1.
56. Mico Třebíč., Firemní materiály – Atesty materiálů, 2015
57. Jurka Trebic, 2016, *Material atest*. 1.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Výkres součástí

Příloha 2 – materiálový certifikát DC01 3 mm

Příloha 3 – materiálový certifikát S235JR 3 mm

Příloha 4 – materiálový certifikát S235JR 6 mm

Příloha 5 – materiálový certifikát C45 3 mm

Příloha 6 – materiálový certifikát C45 3 mm

Příloha 7 – Výsledná mikrostruktura vzorků 31DC01 a 32DC01

Příloha 8 – Výsledná mikrostruktura vzorků 33S235JR a 33S235JR

Příloha 9 – Výsledná mikrostruktura vzorků Nitrogen_3 and Oxygen_3

Příloha 10 – Výsledná mikrostruktura vzorků Plasma_3 and Punching_3

Příloha 11 – Výsledná mikrostruktura vzorků Water jet_3 and 61

Příloha 12 – Výsledná mikrostruktura vzorků Nitrogen_6 and Plasma_6

Příloha 13 – Výsledná mikrostruktura vzorku Water jet_6

Příloha 14 – 62 Graf síly a kroutícího momentu

Příloha 15 – 33S235JR Graf síly a kroutícího momentu

Příloha 16 – 34S235JR Graf síly a kroutícího momentu

Příloha 17 – 31DC01 Graf síly a kroutícího momentu

Příloha 18 – 32DC01 Graf síly a kroutícího momentu

Příloha 19 – Oxygen Graf síly a kroutícího momentu

Příloha 20 – Nitrogen_3 Graf síly a kroutícího momentu

Příloha 21 – Nitrogen_6 Graf síly a kroutícího momentu

Příloha 22 – Waterjet_3 Graf síly a kroutícího momentu

Příloha 23 – Waterjet_6 Graf síly a kroutícího momentu

Příloha 24 – Punch_3 Graf síly a kroutícího momentu

Příloha 25 – Test povrchové úpravy vzorku 33S235JR

Příloha 26 – Test povrchové úpravy vzorku 34S235JR

Příloha 27 – Test povrchové úpravy vzorku 31DC01

Příloha 28 – Test povrchové úpravy vzorku 32DC01

Příloha 29 – Test povrchové úpravy vzorku 62

Příloha 30 – Test povrchové úpravy vzorku Waterjet_3

Příloha 31 – Test povrchové úpravy vzorku Waterjet_6

Příloha 32 – Test povrchové úpravy vzorku Nitrogen_6

Příloha 33 – Test povrchové úpravy vzorku Nitrogen_3

Příloha 34 – Test povrchové úpravy vzorku Oxygen

Příloha 35 – Test povrchové úpravy vzorku Punch

Příloha 2 – materiálový certifikát DC01 3 mm

Tuto kopii dokumentu kontroly vystavila Feronia, a.s. k zakázce č. 408992, s jednoznačným údajem pro přiřazení č. 43728801BK na množství 2560 KG. Původní materiál byl přepracován na rozměry uvedené v dodacím listu k výše uvedené zakázce. Postupy v QMS zaručují spojitost mezi originálem dokumentu a dodaným výrobkem.

14KPSAO

T. F. Karl

Werkzeugnis / Test report nach / according to EN 10204 - 2.2		1002220101 PC4EFEB09101 5455722		ArcelorMittal	
Nr./No.: 214570115000 Datum/Date: 17.08.2014 Hersteller/ Feronia, a.s. Customer: Havlickova up. 1043/11 Praha 1 CZ-11182		Werk-Registrierungsnummer/Works order no.: Kundenbestell-Nr./Cust. order no.: EA-Nr.:		Lieferchein-Nr./Delivery paper No.: Lieferdatum/Delivery date: Wagon, LKW/Wagon, Truck: Masse/Weight (kg): Kundenmaterialnummer DC01 Netto/net: 30810	
Erzeugnis/Product: CRCL / cold rolled coil Stahlsorte/Steel grade: DC01 Lieferbedingung/Terms of delivery: Kaltgewalztes Coils		Empfänger/ Consignee: Feronia, a.s. OZ Hradec Králové Masarykova CZ-50063		Konserv./Surf.-Protection: geölt	
Anzahl/ Quantity: 1 1		Abmessung, mm/ Dimension, mm: 3.000 x 1500,00 3.000 x 1500,00		Band-Nr./ Coil no.: 437282 437288	
Schmelz-Nr./ Cast no.: 145726		Schmelz-Nr./ Cast no.: 145726 145726		Band-Nummern-Zuordnung Coil no. allocation: 437282 → 43728801BK 437288 → 43728801BK	
Schmelzanalyse / ladle analysis (%)					
C	Si	Mn	P	S	Al
0,040	0,006	0,2140	0,009	0,031	0,0035
Prüfergebnisse / Test results					
Bund-Nr./ Coil no.	Proben- Höhhe/ Sample height mm	Streckgrenze R _e /R _e L Yield strength MPa	Streckdehnung A ₅₀ / Elongation %		
437282	2	199	318		
437288	2	199	39,5		
1) Probenerhebung/Sample direction: J-Beugungsrichtung Z-querschnittsverschnitt Z-Beugung					
ArcelorMittal Eisenhüttenstadt GmbH D-15888 Eisenhüttenstadt					
Qualitätsmanagement Quality Department Abnahmebeauftragter Inspection representative T. F. Karl Dipl.-Ing. F. Karl					

Zusätzlich zur Prüfung von Kennzeichnung, Oberfläche, Homogenität und Formabweichungen einer Probekörperzahl... Es wird bestätigt, dass die Lieferung den Anforderungen der Liefervereinbarung entspricht... Diese Bescheinigung wurde nachweislich erstellt und ist nach EN 10204, Abschnitt 5, gültig... Zugabe nach A172006/WP/2003, zertifiziert nach PED (97/23/EC) durch NBB (0237) / Approved in accordance with PED (97/23/EC) and A172006/WP/2003. The delivery meets the requirements of EN 10204-2.2 (2003). The delivery meets the requirements of EN 10204-2.2 (2003).

Příloha 3 – materiálový certifikát S235JR 3 mm

08.09.2014 12:09:33
C-2013-9829

43mm; S235
4 SFY

Tuto kopii dokumentu kontroly vystavila Ferona, a.s. k zakázce č. 395659, s jednoznačným údajem pro přiřazení č. 5214201 na množství 3025 KG. Původní materiál byl přepracován na rozměry uvedené v dodacím listu k výše uvedené zakázce. Postupy v QMS zaručují spojitost mezi originálem dokumentu a dodaným výrobkem.

Inspection certificate according to EN 10 204-3.1

U.S. Steel Košice, s.r.o.
Vstupní areál U.S. Steel
044 54 KOSICE
SLOVAK REPUBLIC

Code: 727PB483/04C
Works Order No: XC3B1332
Advice No: 13/479312 01
Tour order: 1941/2013

Ferona - Dílčí centrum, a. s.
Plzeňská 18
709 05 OSTRAVA
Czech Republic

METALLURGICAL CERTIFICATE NO: 13/479312 01

Desc. of goods: HEAVY PLATES IN COILS		Size: 3,000 x 1265,0 mm EN 10051/10 Mat.No: 2U0062A
Standard: EN 10025-2/04		Net Weight: 53 540 kg
Quality: S235JRC+N	Spec. No: 22697201	

Unit No	Coil No	Heat	Unit No	Coil No	Heat
5214005	5214005	52140	5214201	5214201	52142
5214007	5214007	52140			

MECHANICAL TEST RESULTS

	Min. / Max.	Coil No 5214005	Coil No 5214007	Coil No 5214201
Tensile strength - Rm(1) (MPa)	360/510	449	448	453
Yield point - ReH(1) (MPa)	235/	354	375	350
Elongation A5(1) (%)	24,0/	27,0	18,5	25,5
Direction: (1) - transversal;				

CHEMICAL COMPOSITION, %

	Min. / Max.	Heat No 52140	Heat No 52142		Min. / Max.	Heat No 52140	Heat No 52142
C	/0,17	0,14	0,13	Mn	/1,40	0,51	0,51
Si	/0,03	0,01	0,01	P	/0,035	0,006	0,009
Al	0,020/	0,034	0,033	N	/0,012	0,004	0,003
S	/0,035	0,005	0,007	Cr	/0,205	0,021	0,029
Cu	/0,55	0,02	0,04	CEV	/0,359	0,233	0,224
Mo	/0,060	0,002	0,002	Ni	/0,205	0,010	0,015
V	/0,008	0,001	0,001				

On the basis of the IAEA recommendation allowed limit of weight-based activity of a heat sample amounts up to 300 Bq/kg.

The measured weight-based activity of Co60 + Cs137 radionuclide is not higher than 100 Bq/kg.

Košice: 18.11.2013, 7:39:39 THE MATERIAL IS IN COMPLIANCE WITH ORDER REQUIREMENTS.

JOSEF ČERVENÁK, AUTHORIZED INSPECTION REPRESENTATIVE, e-mail: jcarvensk@sk.usc.com, tel.: +421-55-6737464

DARINA BERNÁTOVÁ, AUTHORIZED INSPECTION REPRESENTATIVE, e-mail: dbernato@sk.usc.com, tel.: +421-55-6732373

139 Last Page: 1
P-USM/0063-04/10-01-12



U. S. Steel Košice, s.r.o.
Vstupní areál U. S. STEEL
Odd. Analýzy kvality a specifikácie
L'vňikovanie výrobkov a Hutmé stesky
044 54 Košice

02

Příloha 4 – materiálový certifikát S235JR 6 mm

Tuto kopii dokumentu kontroly vystavila Feron, a.s. k zakázce č. 395659, s jednoznačným údajem pro přiřazení č. 443771000 na množství 3058 KG. Původní materiál byl přepracován na rozměry uvedené v dodacím listu k výše uvedené zakázce. Postupy v QMS zaručují spojitost mezi originálem dokumentu a dodaným výrobkem.

Inspection certificate according to EN 10 204-3.1

U. S. Steel Košice, s.r.o.
Vetúpný 10, 044 54 Košice
SLOVAK REPUBLIC

Code: 727PC1W/06C
Works Order No: XC452503
Advice No: 24/382032 01
Your order: 1640/2014

Feron - Servis Centrum
Slovakia, a.s.
Prístavná 12
821 09 BRATISLAVA
Slovak Republic

METALLURGICAL CERTIFICATE NO: 14/582002 01

Desc. of goods: HEAVY PLATES IN COILS			Size: 8,000 x 1000,0 EN 10051/10		
Standard: EN 10025-2/04			Net Weight: 28 490 kg		
Quality: S235JRC+H					
Spec. No: 21284001					
Unit No	Coil No	Heat	Unit No	Coil No	Heat
4437710	4437710	44377	4437804	4437804	44378

MECHANICAL TEST RESULTS

	Min. / Max.	Coil No 4437710	Coil No 4437804
Tensile streng.-Re _m (1) (MPa)	360/510	436	424
Yield point-ReH(1) (MPa)	235/	267	273
Elongation A5(1) (%)	24,0/	35,0	36,5
Direction: (1)-transversal;			

CHEMICAL COMPOSITION, %

	Min. / Max.	Heat No 44377	Heat No 44378		Min. / Max.	Heat No 44377	Heat No 44378
C	/0,17	0,14	0,14	Mn	/1,40	0,51	0,52
Si	/0,03	0,01	0,01	P	/0,035	0,016	0,015
Al	0,020/	0,037	0,039	N	/0,012	0,004	0,004
S	/0,035	0,006	0,007	Cu	/0,205	0,022	0,023
Cu	/0,55	0,02	0,03	CEV	/0,350	0,232	0,234
Mo	/0,060	0,002	0,002	Ni	/0,205	0,012	0,013
V	/0,008	0,001	0,001				

On the basis of the IAEA recommendation allowed limit of weight-based activity of a heat sample amounts up to 310 Bq/kg.

The measured weight-based activity of Co60 + Cs137 radionuclide is not higher than 100 Bq/kg.

Košice: 25.05.2014, 7:30:44 THE MATERIAL IS IN COMPLIANCE WITH ORDER REQUIREMENTS.

JOSEF ČERVENÁK, AUTHORIZED INSPECTION REPRESENTATIVE. e-mail: jcervenak@sk.usc.com, tel.: +421-55-6737464
DARIANA BEŠUTOVÁ, AUTHORIZED INSPECTION REPRESENTATIVE. e-mail: dbernato@sk.usc.com, tel.: +421-55-6732373


06
1015 B-30-20300-06

U. S. Steel Košice, s.r.o. 02
Vstupný areál U. S. STEEL
Odbor Analýzy kvality a špecifikácie
Uvoľňovanie výrobkov a Hútné alasty
044 54 Košice

Document certified by Josef Červenák - jcervenak@sk.usc.com.
Digitally signed by Josef Červenák
Date: 2014.05.26

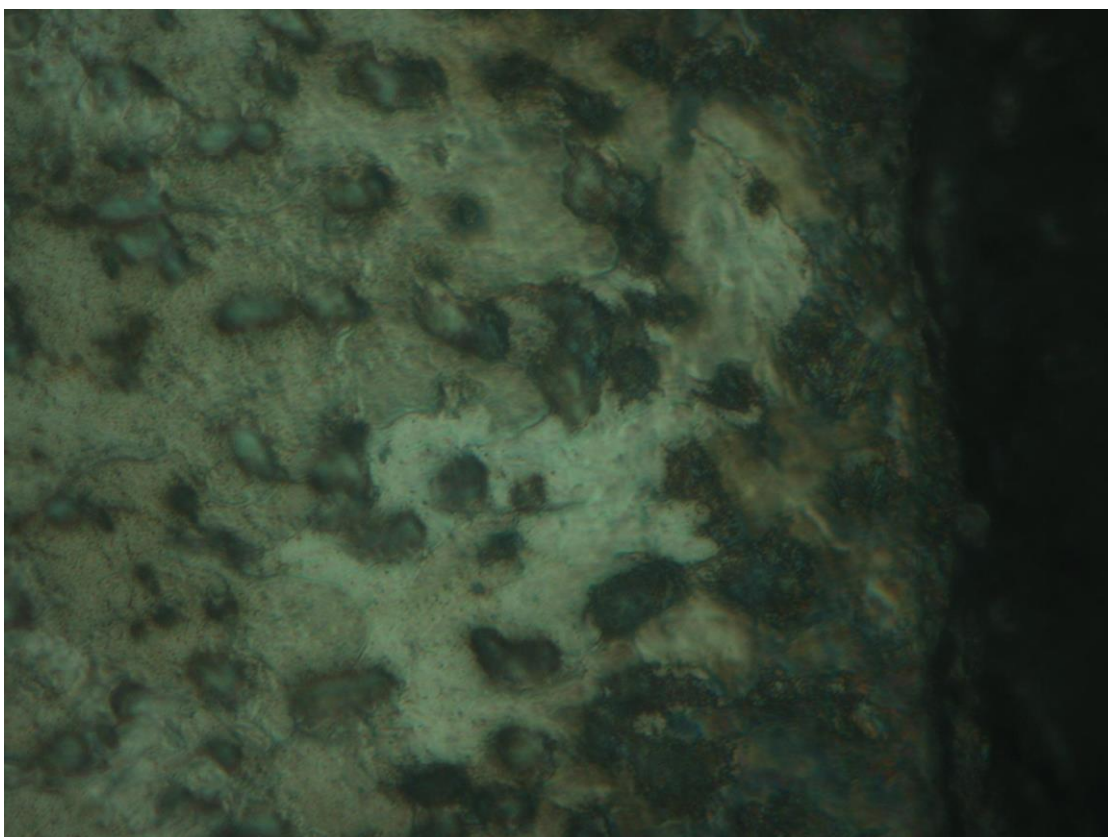
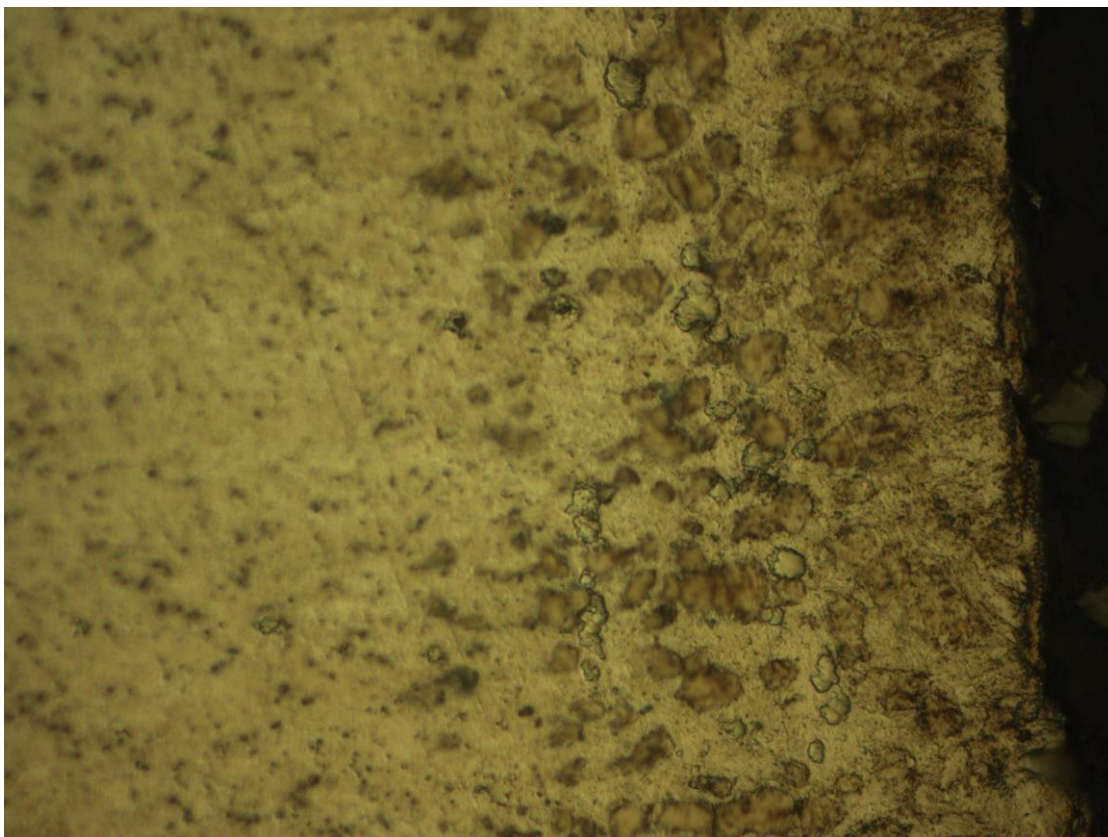
TECHNOLOGICKÉ CENTRUM A.S.
KULKOVA 14
BRNO
614 00

Tuto kopii dokumentu kontroly vystavila Feron, a.s. k zakázce č. 74119, s jednoznačným údajem pro přiřazení č. 286774 na množství 788 KG. Postupy v QMS zaručují spojitost mezi originálem dokumentu a dodaným výrobkem.

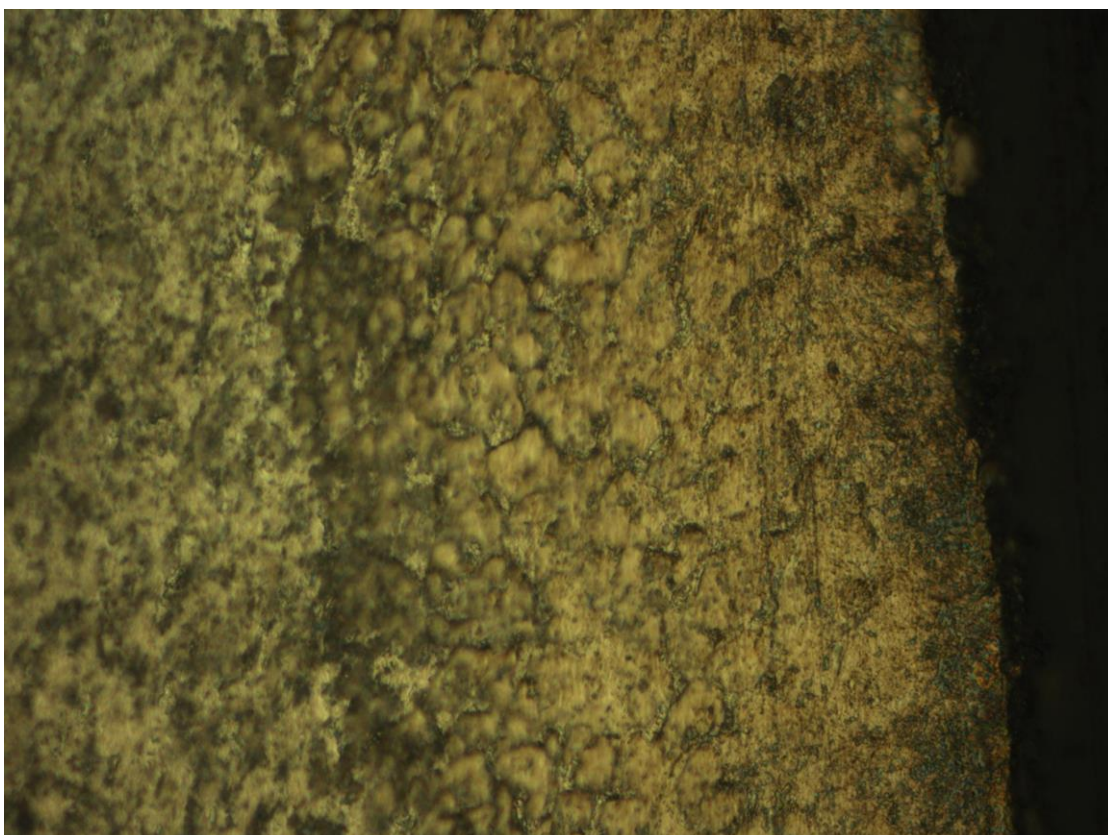
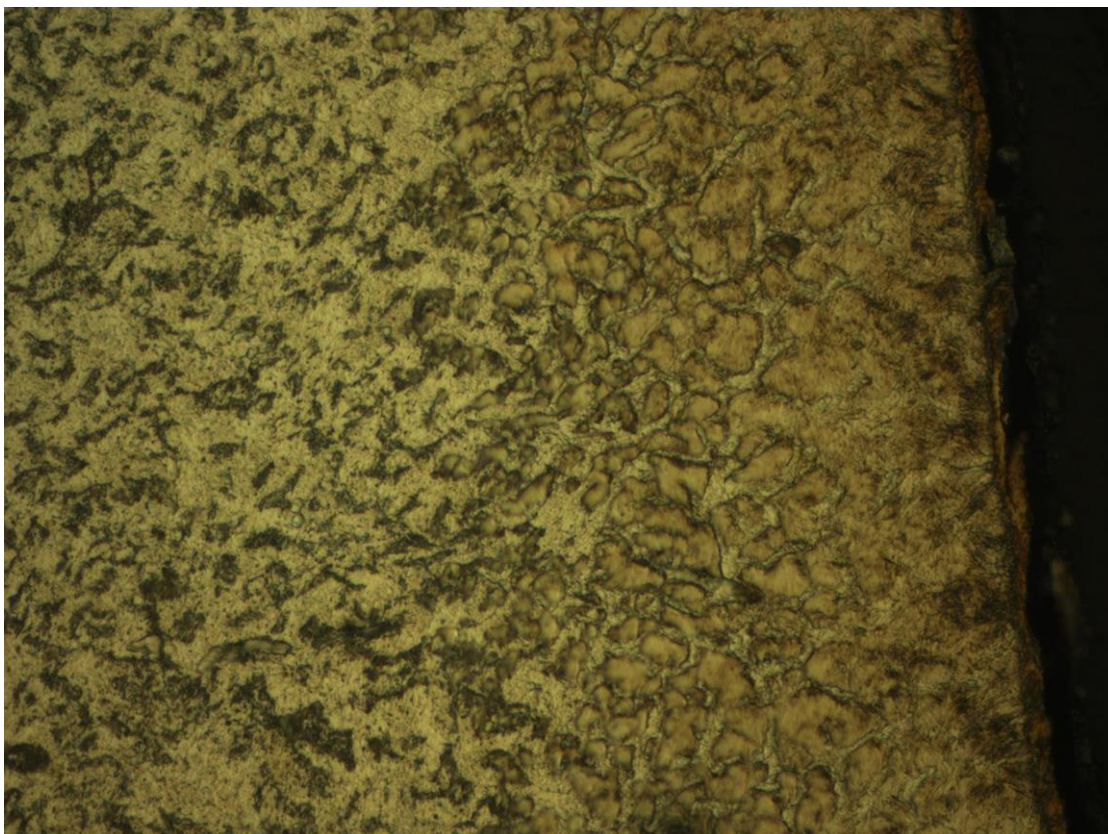
 ACRON ACRON s.p.a. - Costa Biotec Kdrča 44, SI-4270 Jesenice		Industrijska konfika Aussteller der Bescheinigung Originator of the document		KONTROLA KAKOVOSTI Telefon: +386 4 584 10 40 Telefaks: +386 4 584 10 68 http://www.acron.si/ E-mail: miron.plesnig@acron.si	
Potrdilo o prevzemu 3.1/ Abnahmeprufzeugnis 3.1/ Inspection certificate 3.1					
Stran/Strana Page 1 / 2 Str./Str. / Fol.		Šifra No 204 1 Datum / Datum / Date		Nadarok / Grade / Customer	
20643848-1		17.12.2013		KOVINTRADE PRAHA SPOL. S R.O.	
Naručilo / Bestellung Nr. / Order No. 4510075951 exp 0		Dobavna št./ Lieferschein / Dispatch note 20643848 shomtrava		17.12.2013	
Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils		Vrsta povi / Erzeugnisart / Making process E + VD		Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils	
Specifikacije / Technische / Specifications DIN EN 10083-2 EN 10051		Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils		Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils	
20643848-1		17.12.2013		KOVINTRADE PRAHA SPOL. S R.O.	
4510075951 exp 0		Dobavna št./ Lieferschein / Dispatch note 20643848 shomtrava		17.12.2013	
Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils		Vrsta povi / Erzeugnisart / Making process E + VD		Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils	
Specifikacije / Technische / Specifications DIN EN 10083-2 EN 10051		Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils		Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils	
20643848-1		17.12.2013		KOVINTRADE PRAHA SPOL. S R.O.	
4510075951 exp 0		Dobavna št./ Lieferschein / Dispatch note 20643848 shomtrava		17.12.2013	
Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils		Vrsta povi / Erzeugnisart / Making process E + VD		Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils	
Specifikacije / Technische / Specifications DIN EN 10083-2 EN 10051		Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils		Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils	
20643848-1		17.12.2013		KOVINTRADE PRAHA SPOL. S R.O.	
4510075951 exp 0		Dobavna št./ Lieferschein / Dispatch note 20643848 shomtrava		17.12.2013	
Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils		Vrsta povi / Erzeugnisart / Making process E + VD		Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils	
Specifikacije / Technische / Specifications DIN EN 10083-2 EN 10051		Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils		Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils	
20643848-1		17.12.2013		KOVINTRADE PRAHA SPOL. S R.O.	
4510075951 exp 0		Dobavna št./ Lieferschein / Dispatch note 20643848 shomtrava		17.12.2013	
Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils		Vrsta povi / Erzeugnisart / Making process E + VD		Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils	
Specifikacije / Technische / Specifications DIN EN 10083-2 EN 10051		Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils		Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils	
20643848-1		17.12.2013		KOVINTRADE PRAHA SPOL. S R.O.	
4510075951 exp 0		Dobavna št./ Lieferschein / Dispatch note 20643848 shomtrava		17.12.2013	
Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils		Vrsta povi / Erzeugnisart / Making process E + VD		Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils	
Specifikacije / Technische / Specifications DIN EN 10083-2 EN 10051		Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils		Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils	
20643848-1		17.12.2013		KOVINTRADE PRAHA SPOL. S R.O.	
4510075951 exp 0		Dobavna št./ Lieferschein / Dispatch note 20643848 shomtrava		17.12.2013	
Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils		Vrsta povi / Erzeugnisart / Making process E + VD		Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils	
Specifikacije / Technische / Specifications DIN EN 10083-2 EN 10051		Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils		Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils	
20643848-1		17.12.2013		KOVINTRADE PRAHA SPOL. S R.O.	
4510075951 exp 0		Dobavna št./ Lieferschein / Dispatch note 20643848 shomtrava		17.12.2013	
Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils		Vrsta povi / Erzeugnisart / Making process E + VD		Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils	
Specifikacije / Technische / Specifications DIN EN 10083-2 EN 10051		Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils		Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils	
20643848-1		17.12.2013		KOVINTRADE PRAHA SPOL. S R.O.	
4510075951 exp 0		Dobavna št./ Lieferschein / Dispatch note 20643848 shomtrava		17.12.2013	
Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils		Vrsta povi / Erzeugnisart / Making process E + VD		Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils	
Specifikacije / Technische / Specifications DIN EN 10083-2 EN 10051		Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils		Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils	
20643848-1		17.12.2013		KOVINTRADE PRAHA SPOL. S R.O.	
4510075951 exp 0		Dobavna št./ Lieferschein / Dispatch note 20643848 shomtrava		17.12.2013	
Vrsta / Vrsta / Product Hot rolled coils		Vrsta povi / Erzeugnisart / Making process E + VD		Vrsta / Vrsta / Product Hot	

148

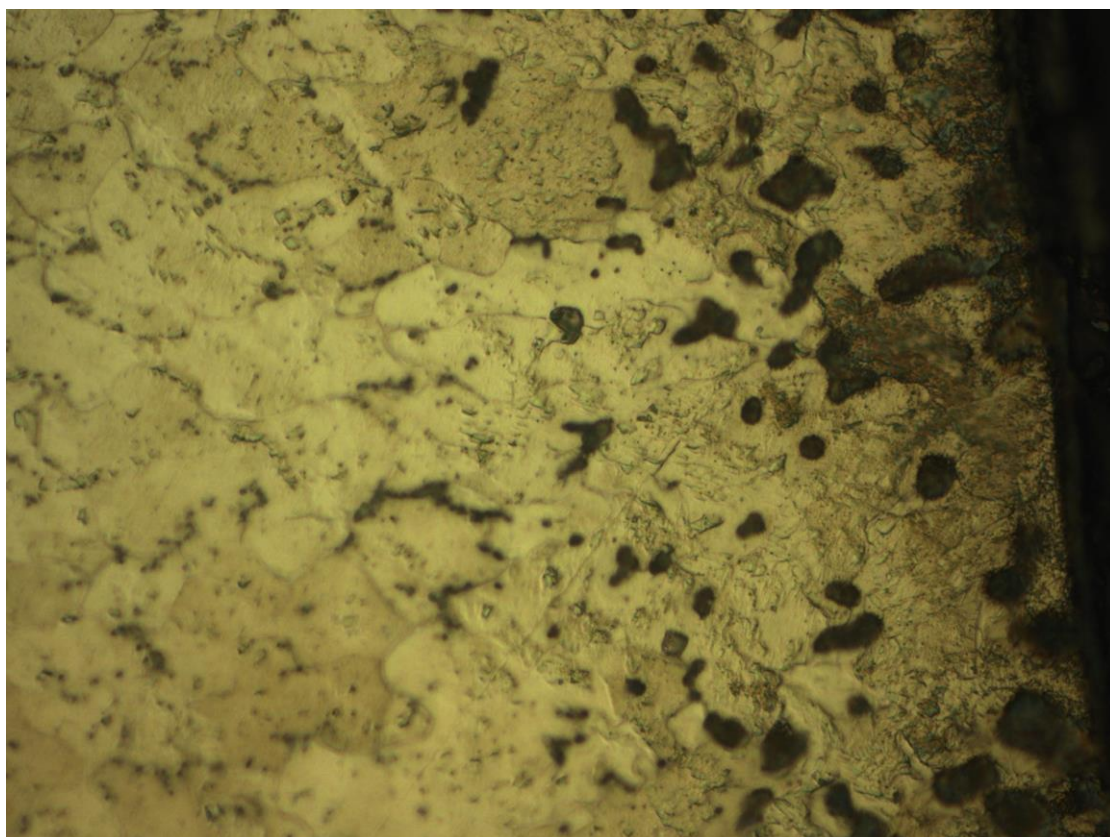
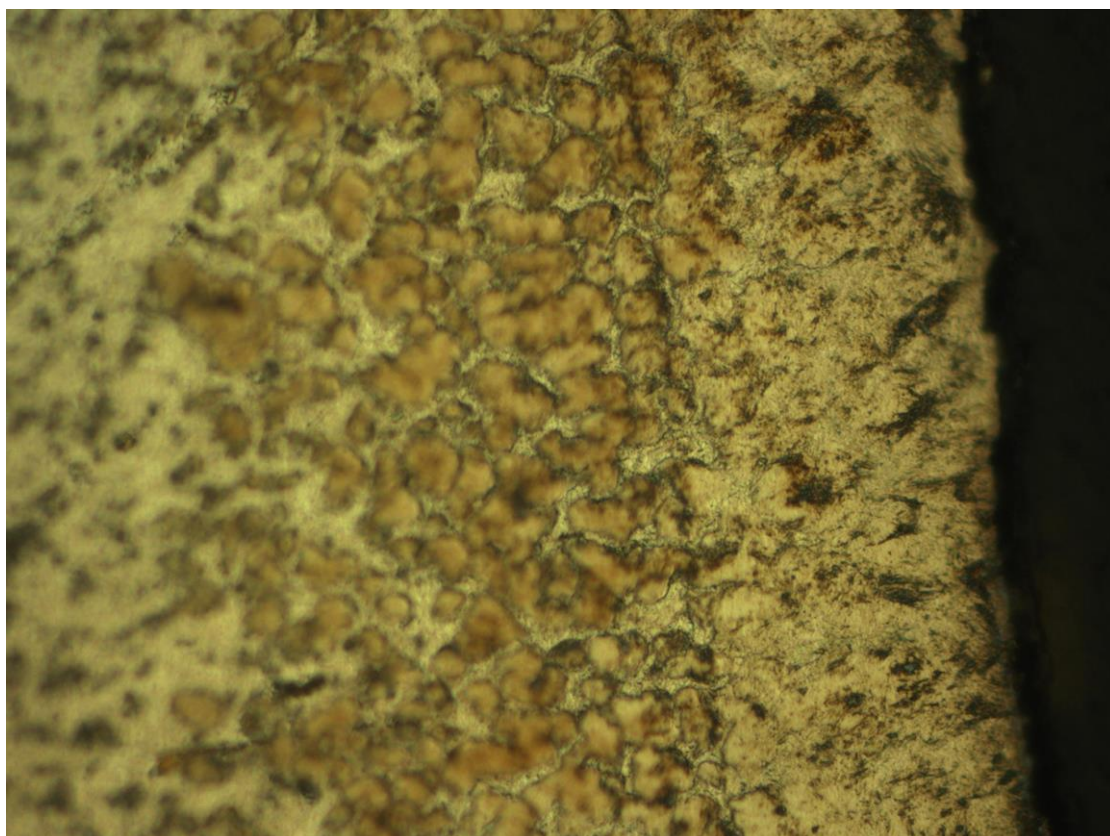
Příloha 7 – Výsledná mikrostruktura vzorků 31DC01 a 32DC01



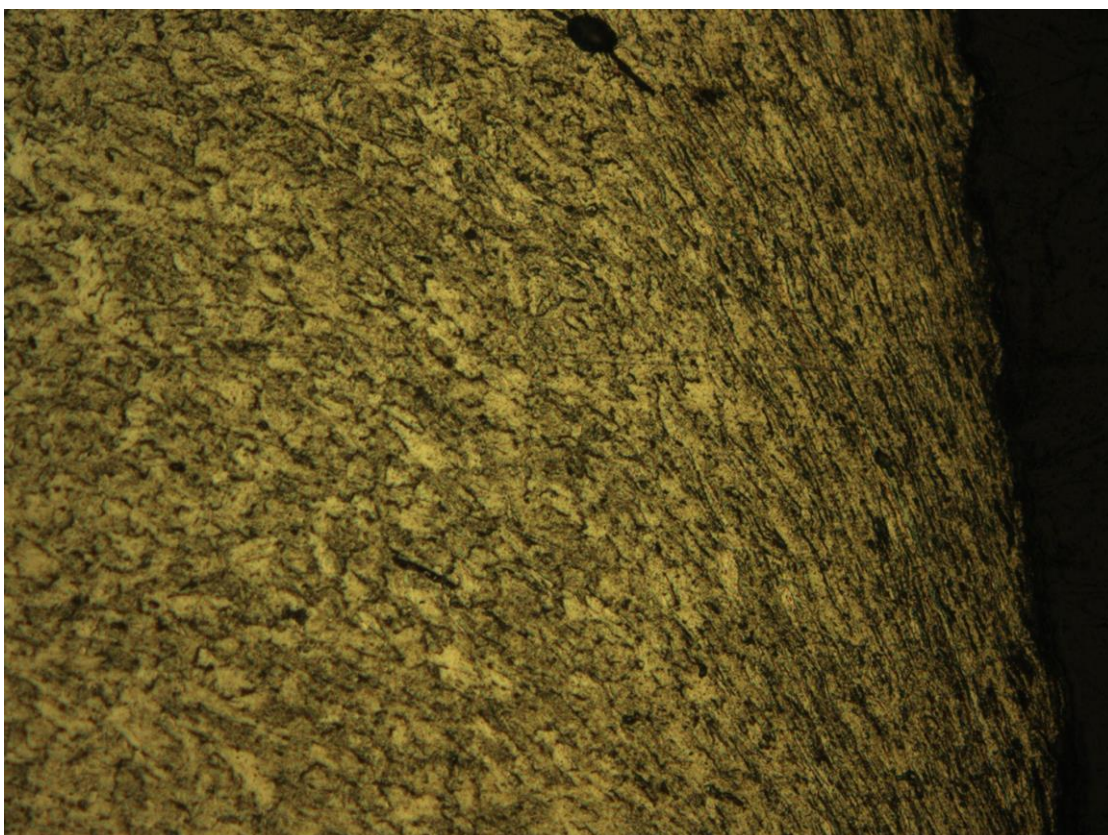
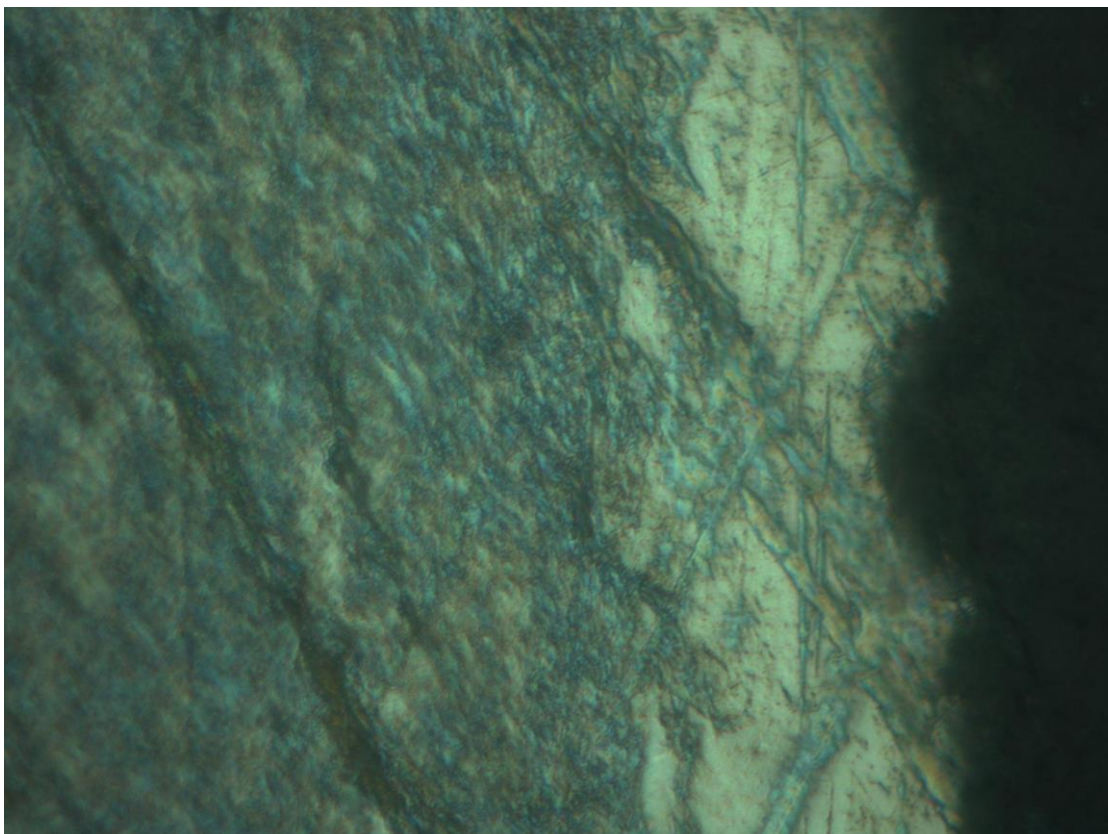
Příloha 8 – Výsledná mikrostruktura vzorků 33S235JR a 33S235JR



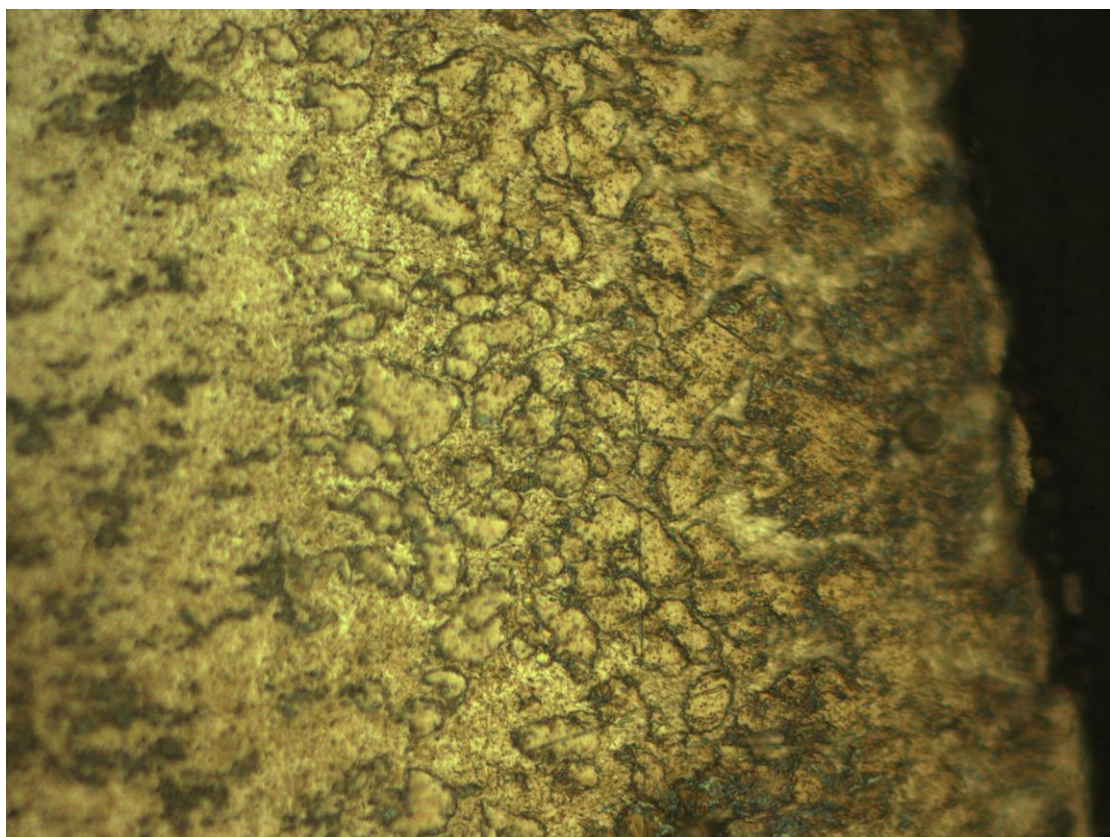
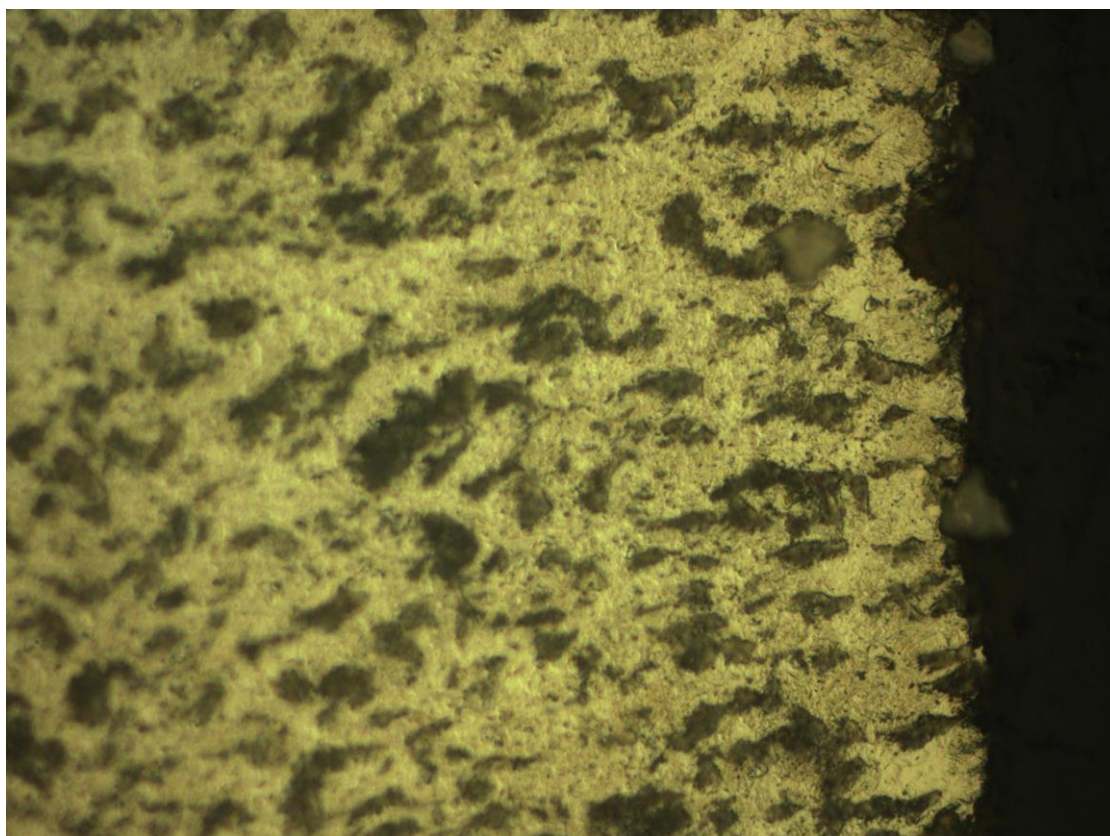
Příloha 9 – Výsledná mikrostruktura vzorků Nitrogen_3 and Oxygen_3



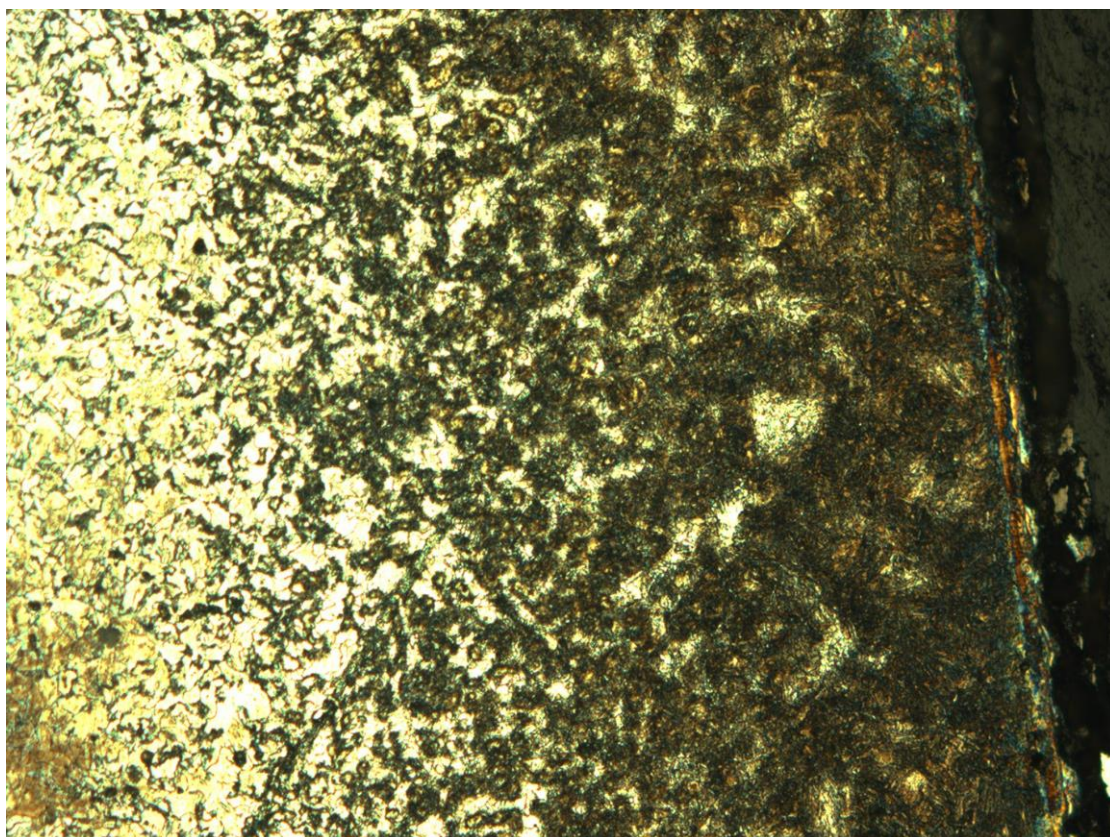
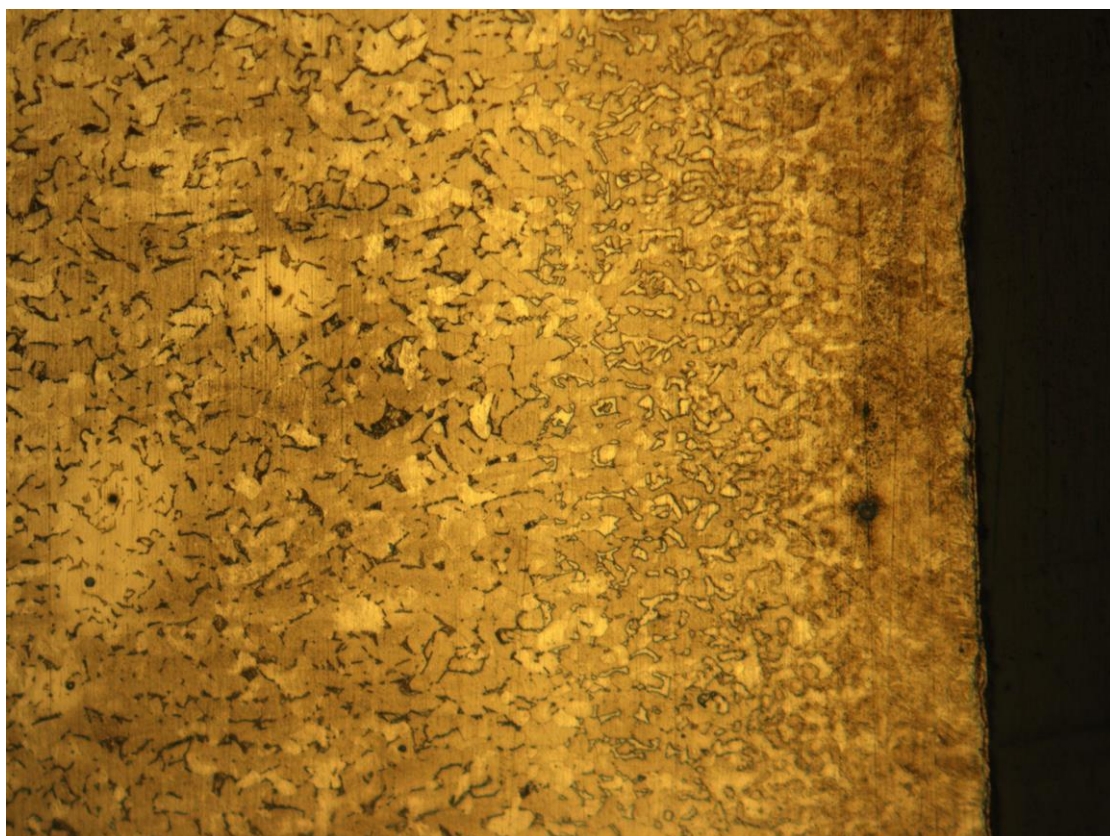
Příloha 10 – Výsledná mikrostruktura vzorků Plasma_3 and Punching_3



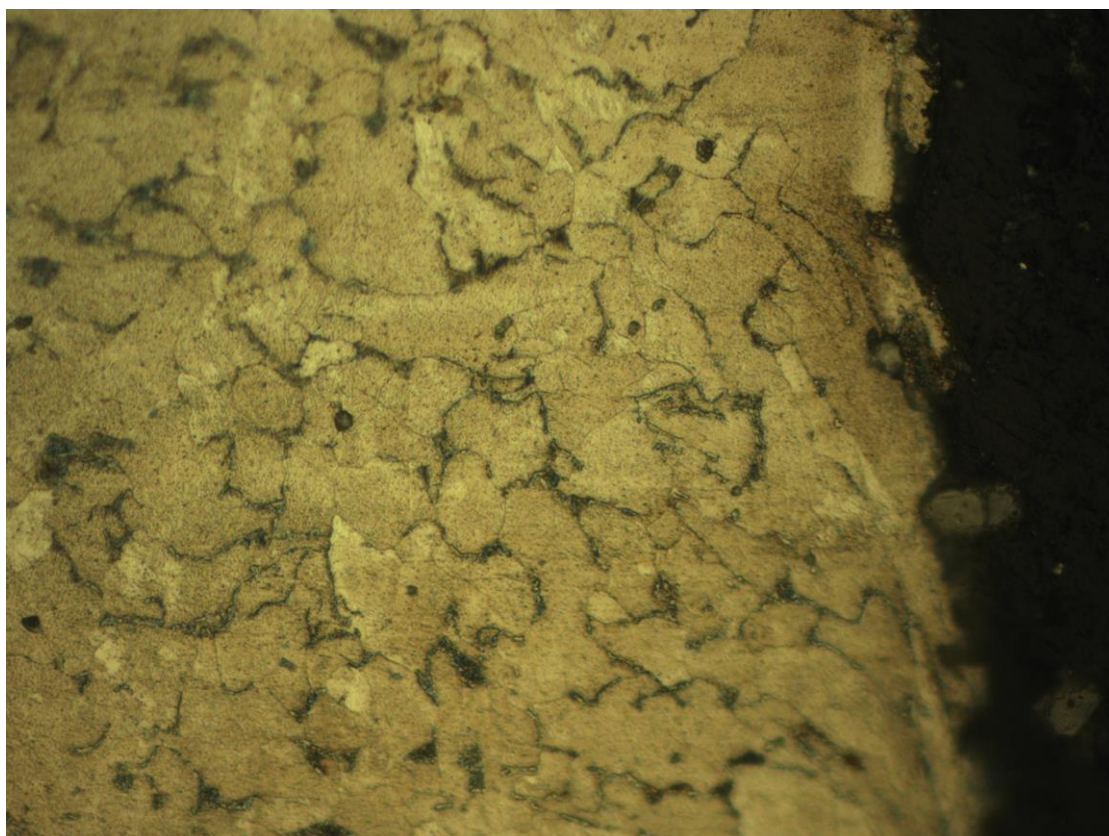
Příloha 11 – Výsledná mikrostruktura vzorků Water jet_3 and 61



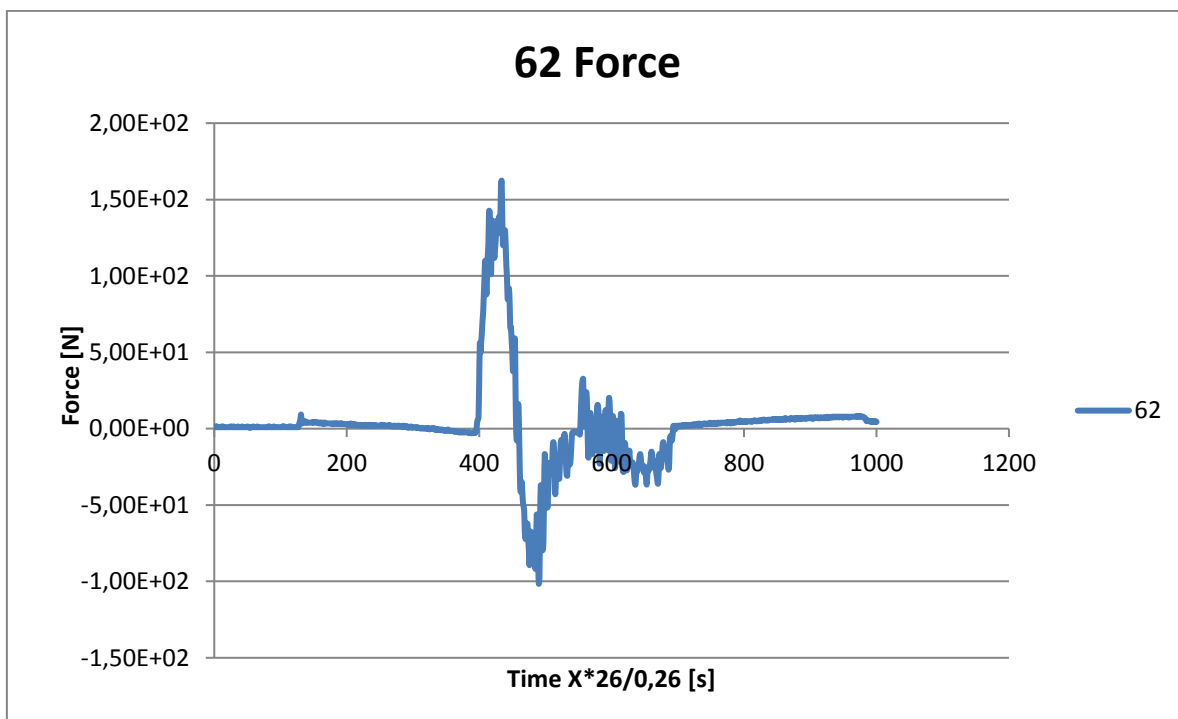
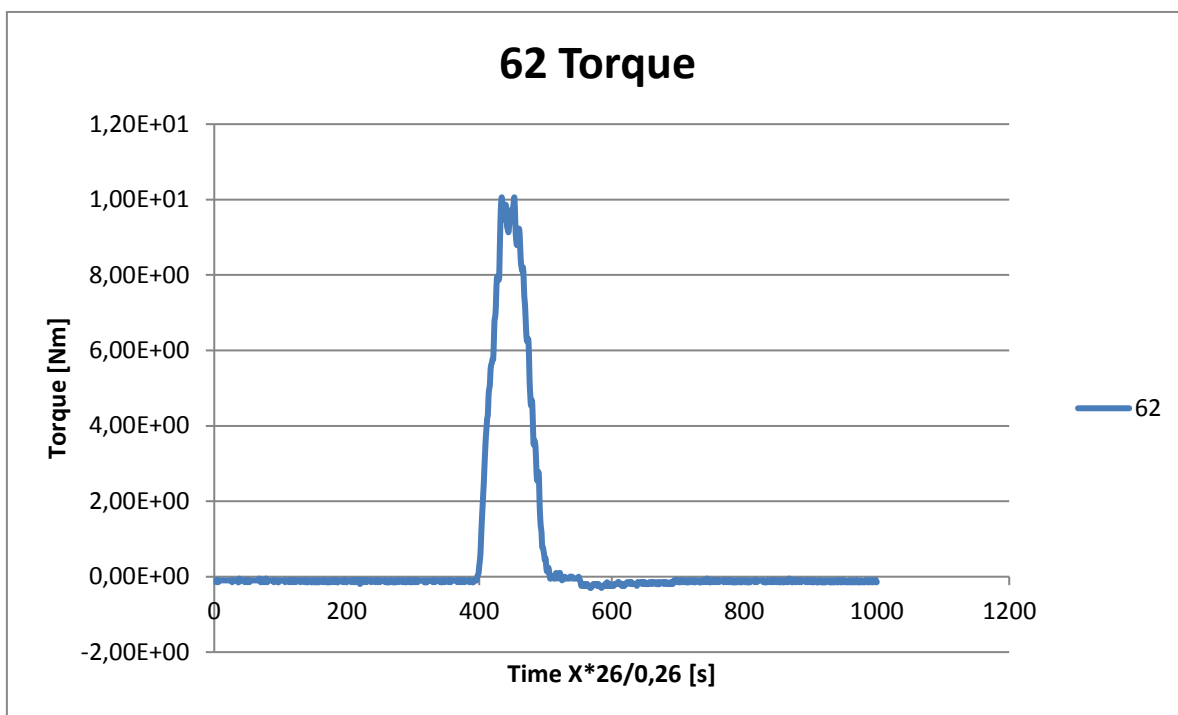
Příloha 12 – Výsledná mikrostruktura vzorků Nitrogen_6 and Plasma_6



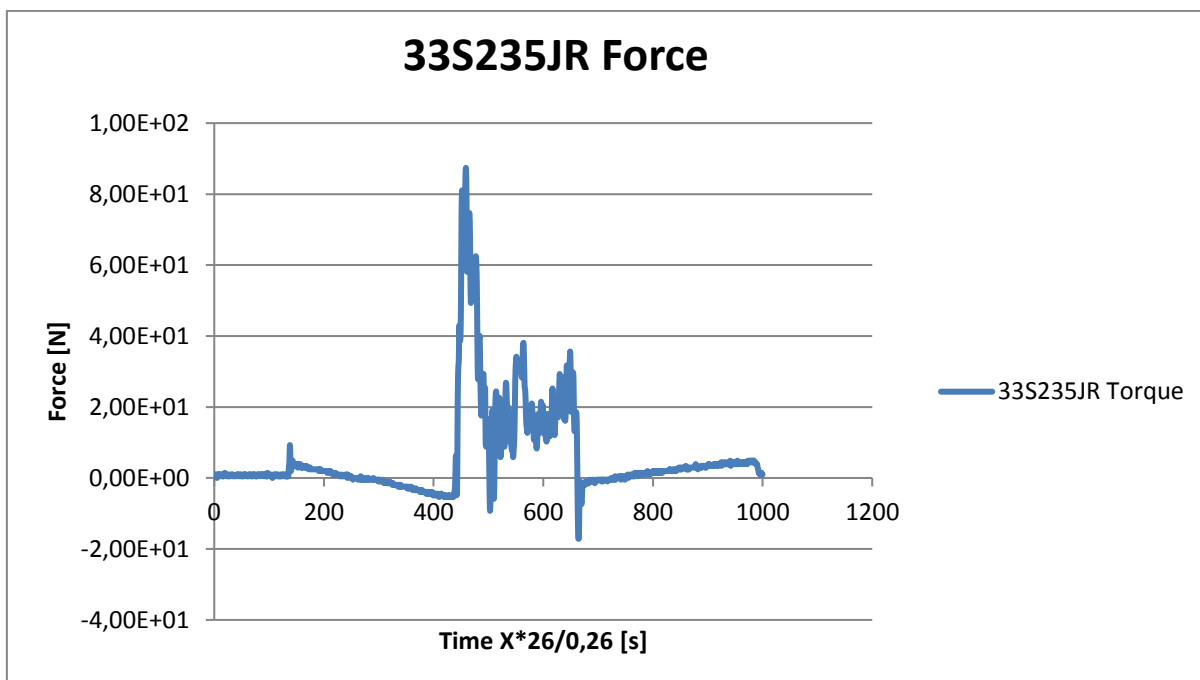
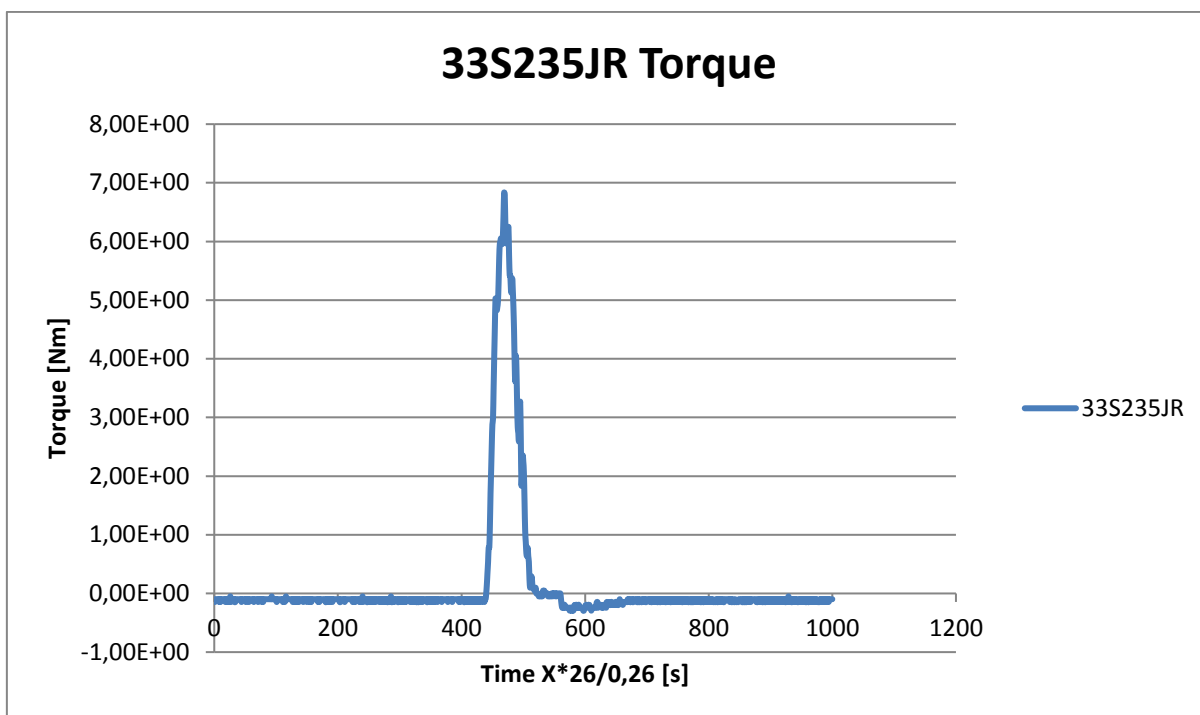
Příloha 13 – Výsledná mikrostruktura vzorku Water jet_6



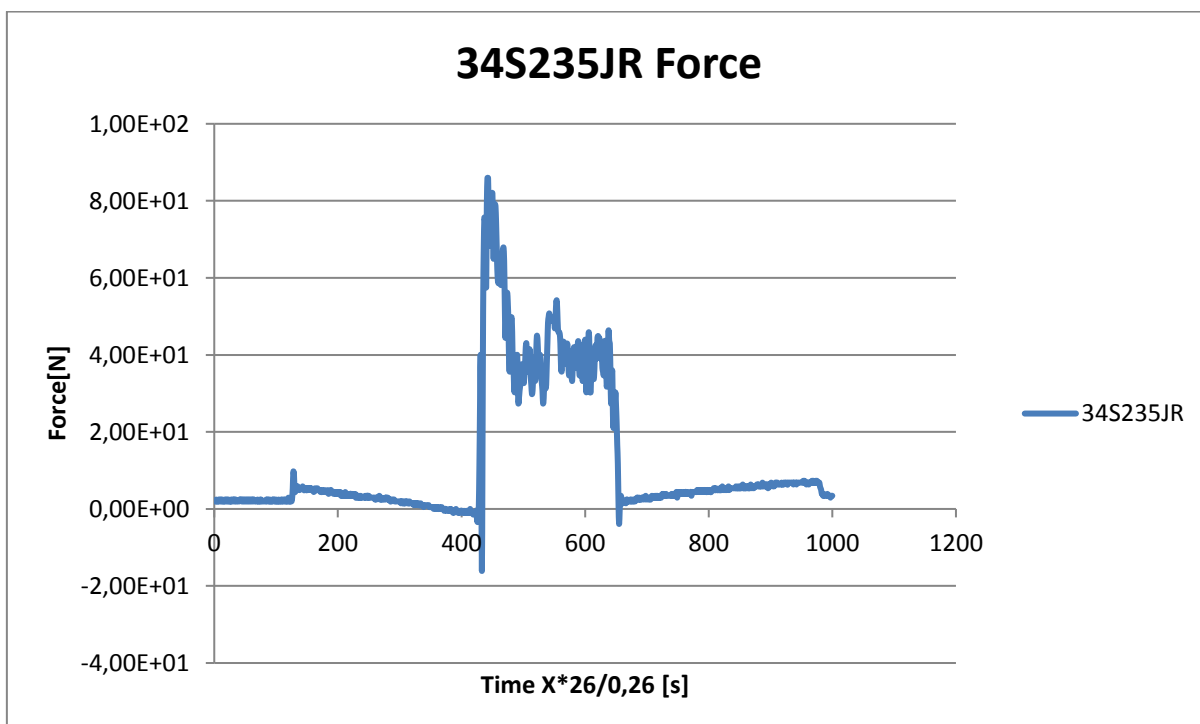
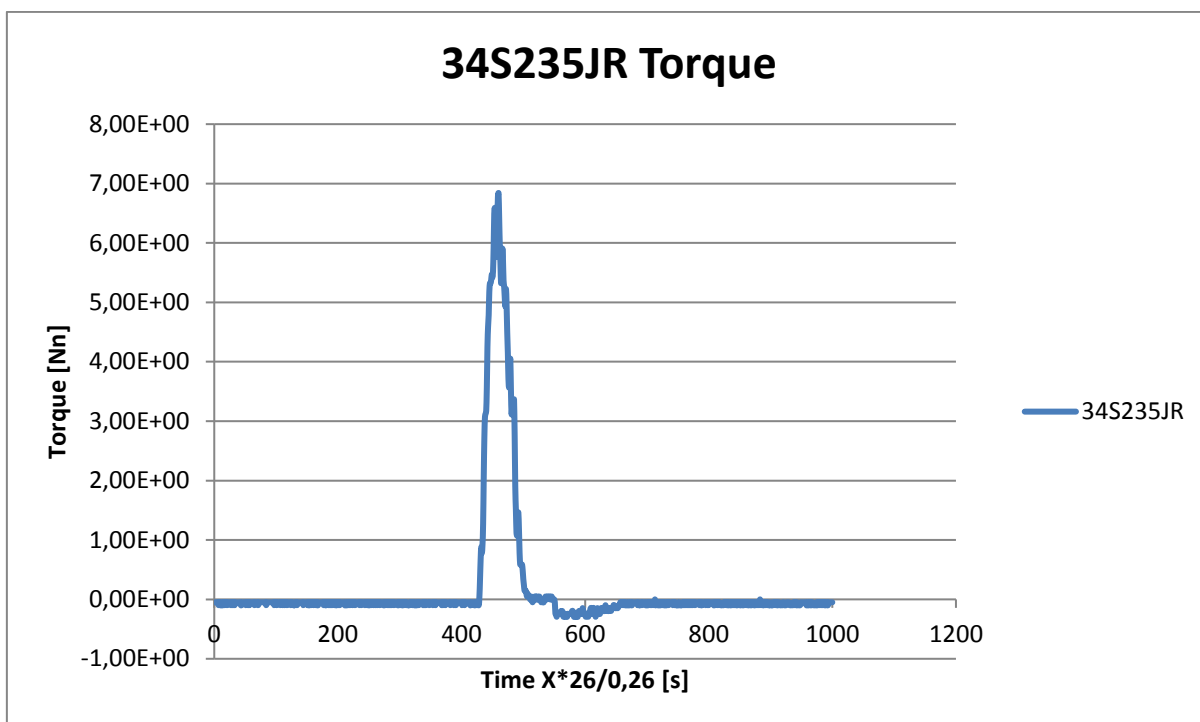
Příloha 14 – 62 Graf síly a kroutícího momentu



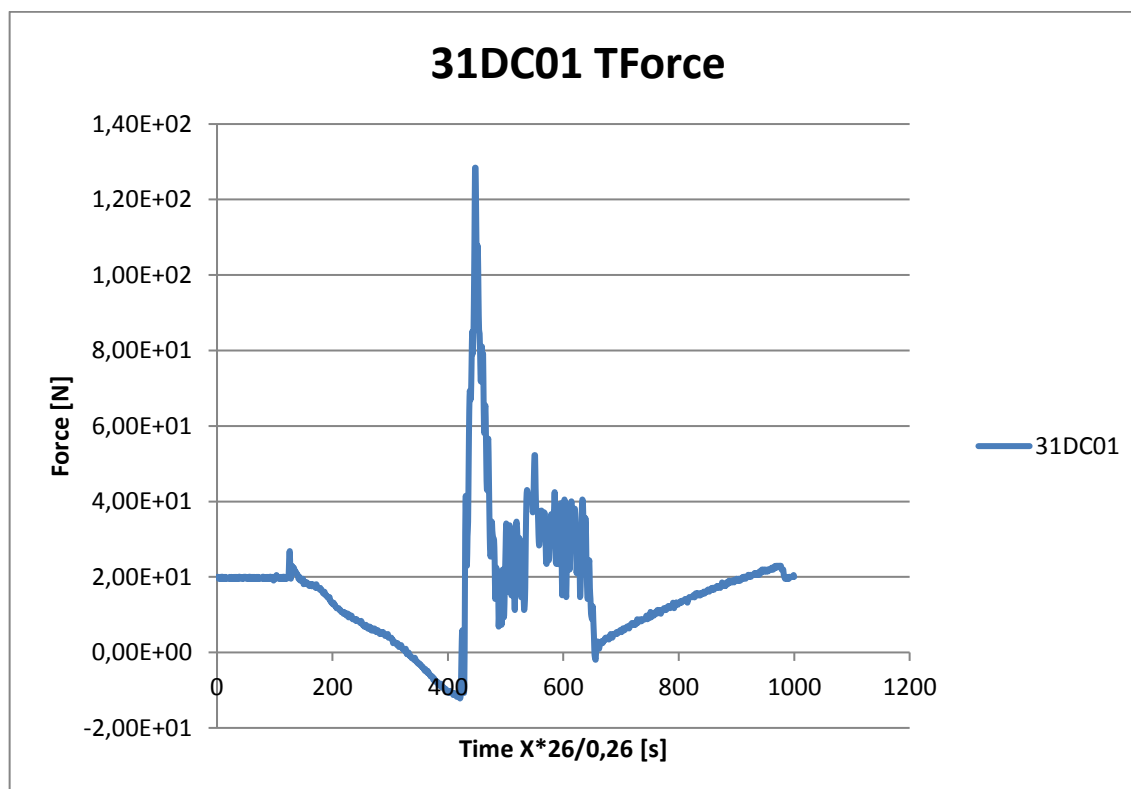
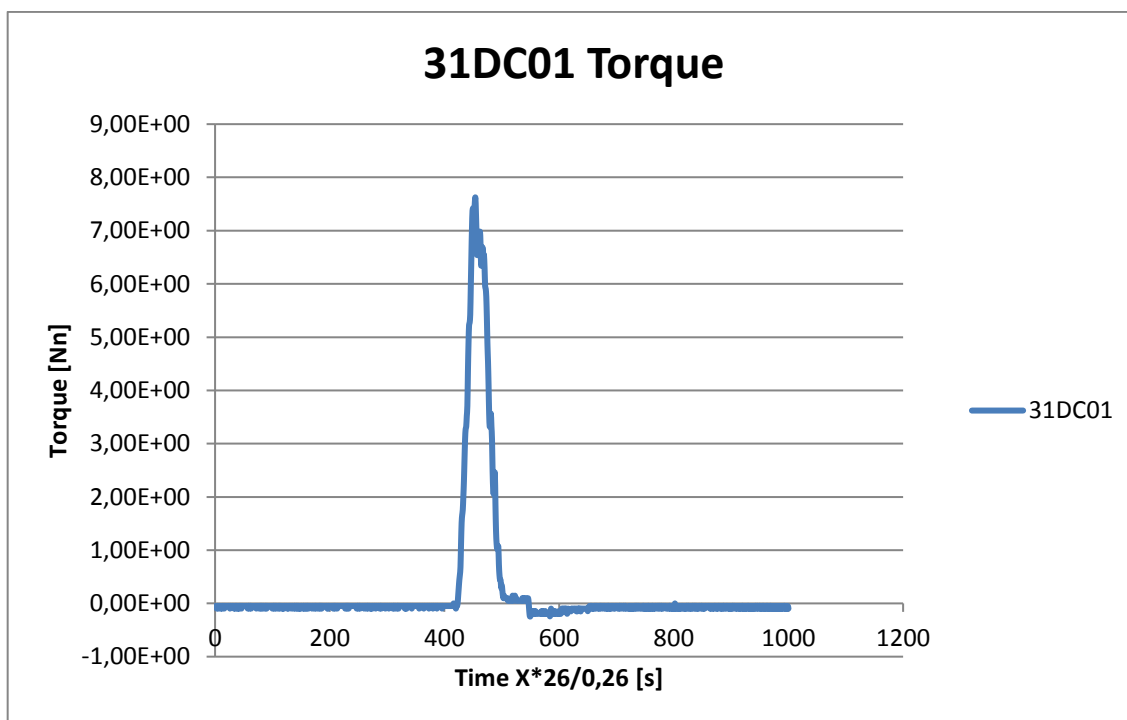
Příloha 15 – 33S235JR Graf síly a kroutícího momentu



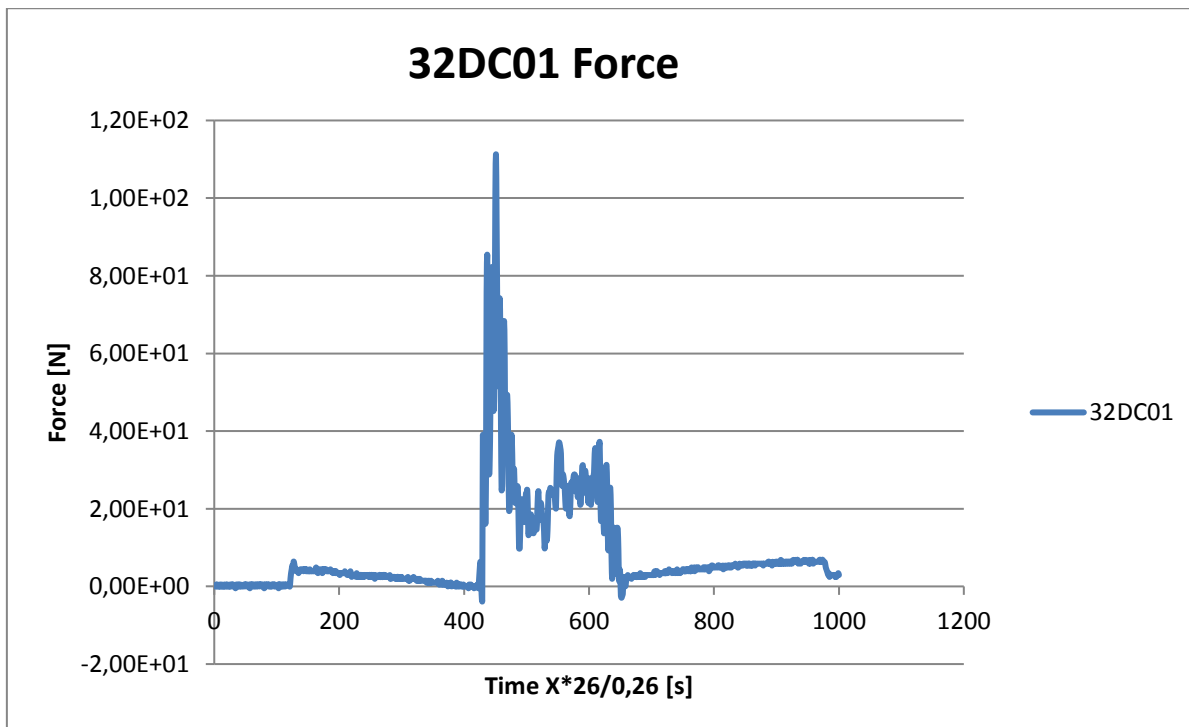
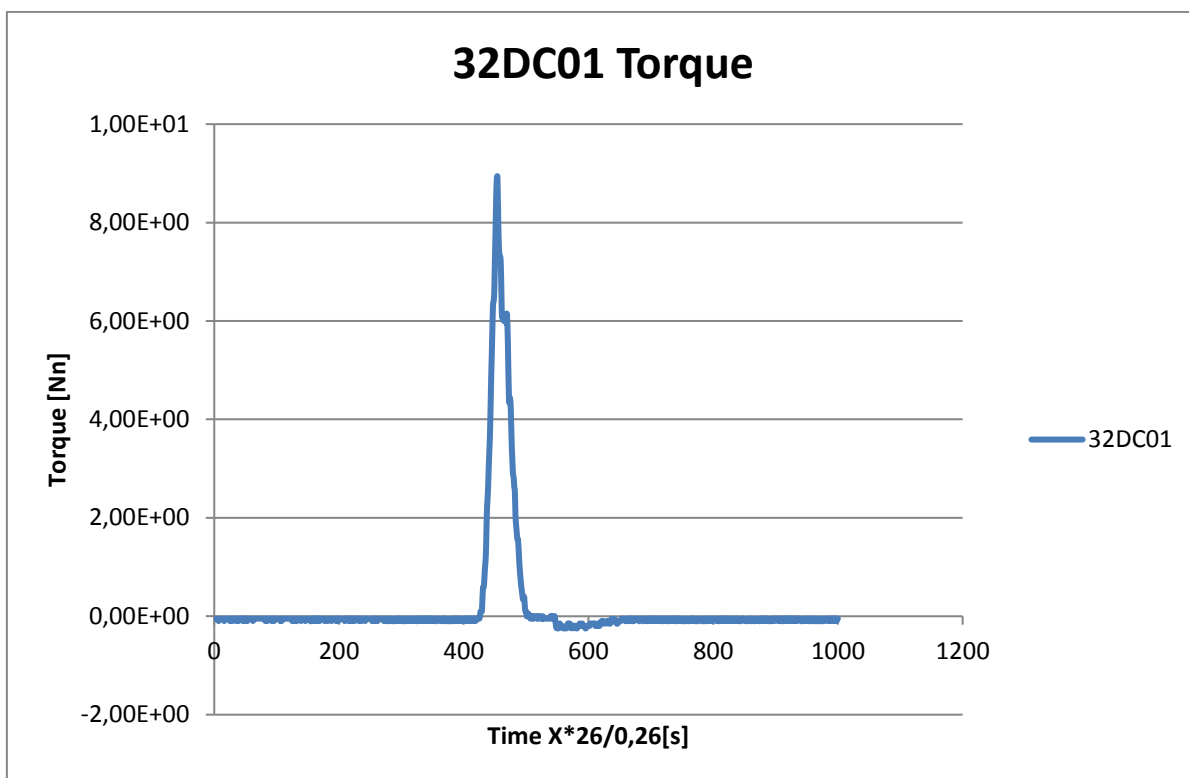
Příloha 16 – 34S235JR Graf síly a kroutícího momentu



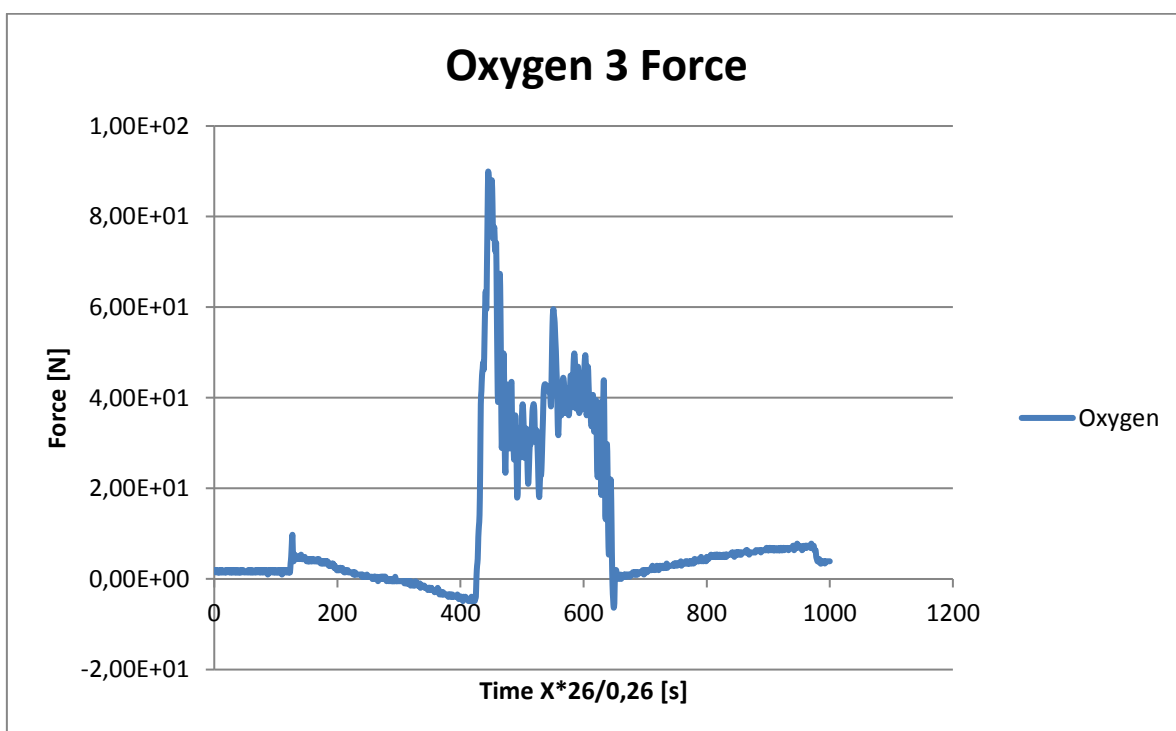
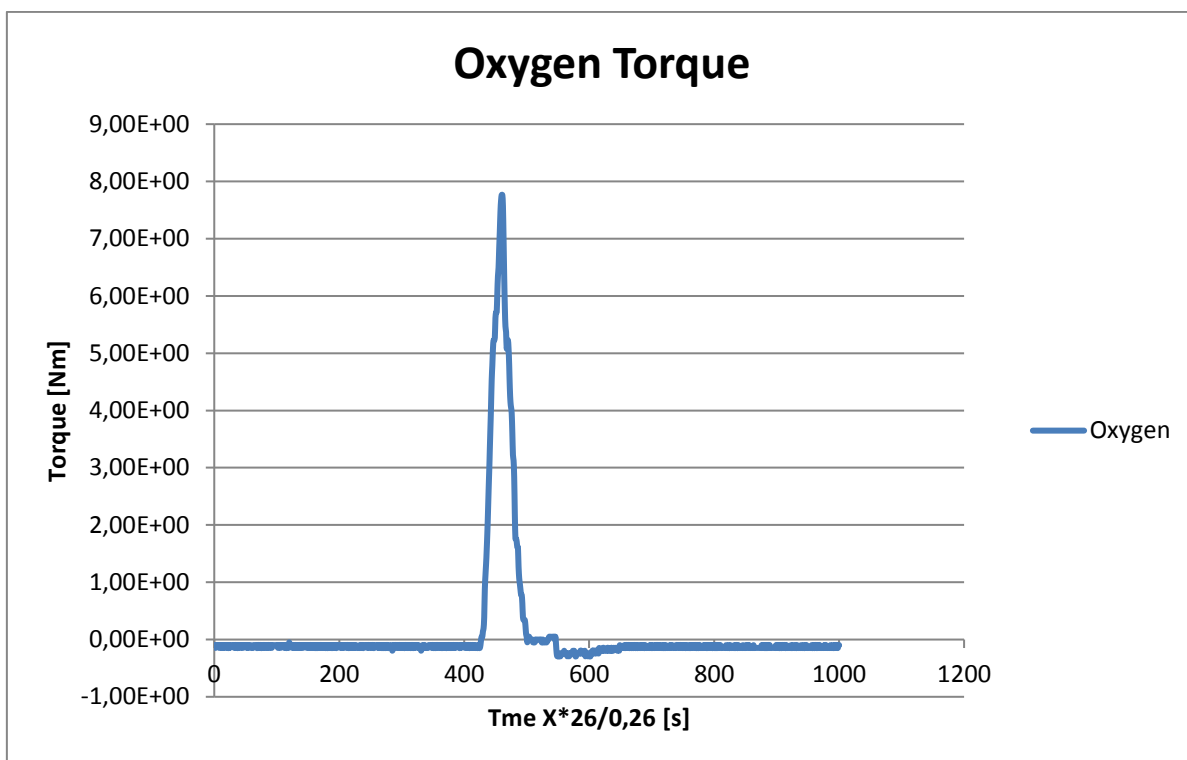
Příloha 17 – 31DC01 Graf síly a krouticího momentu



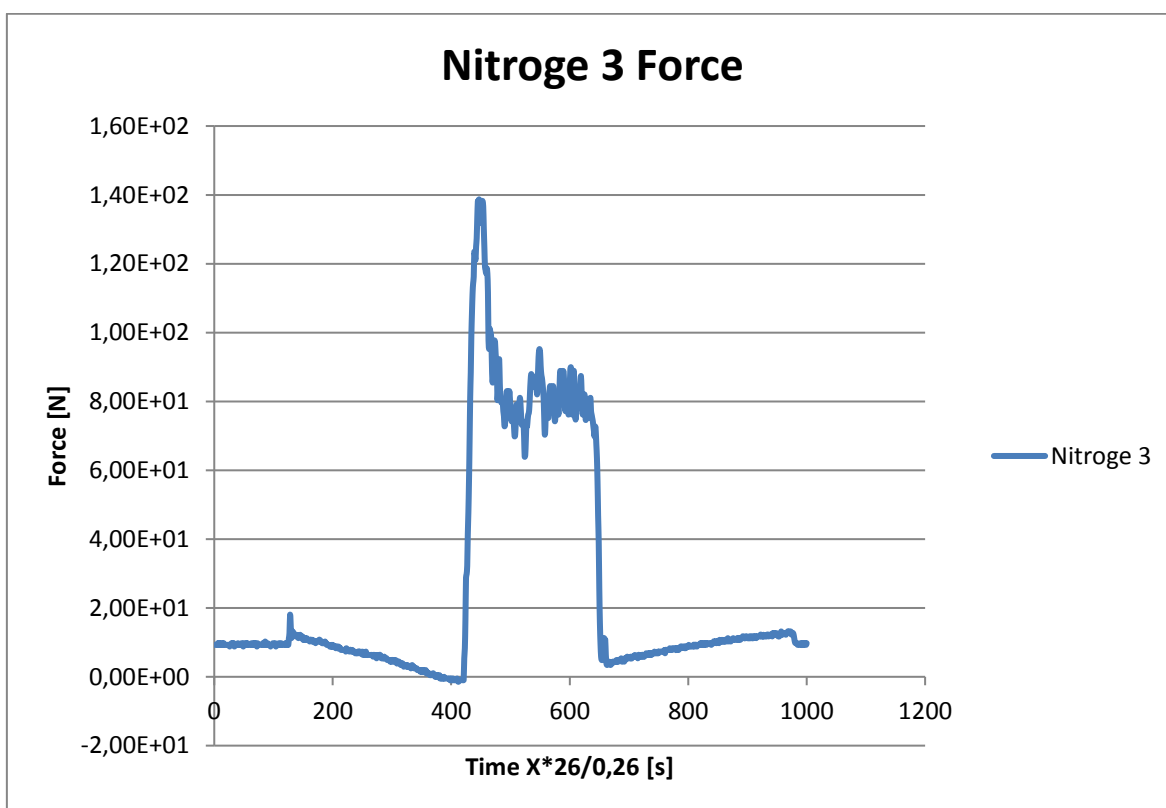
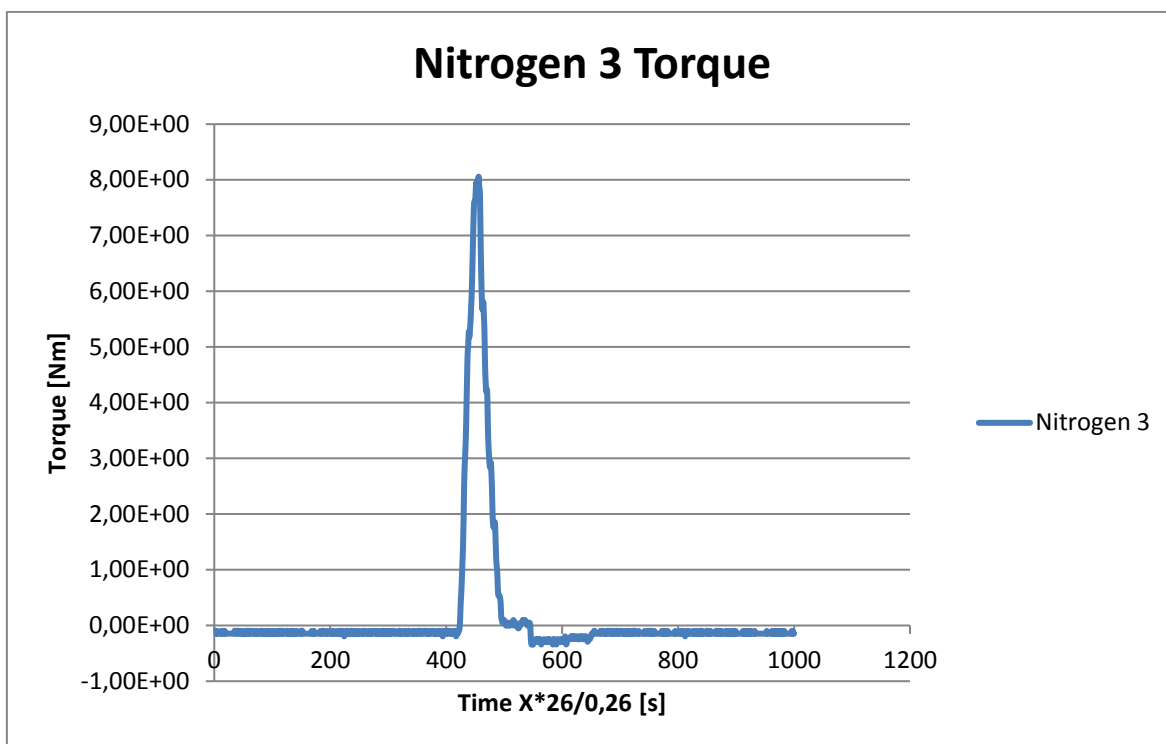
Příloha 18 – 32DC01 Graf síly a kroutícího momentu



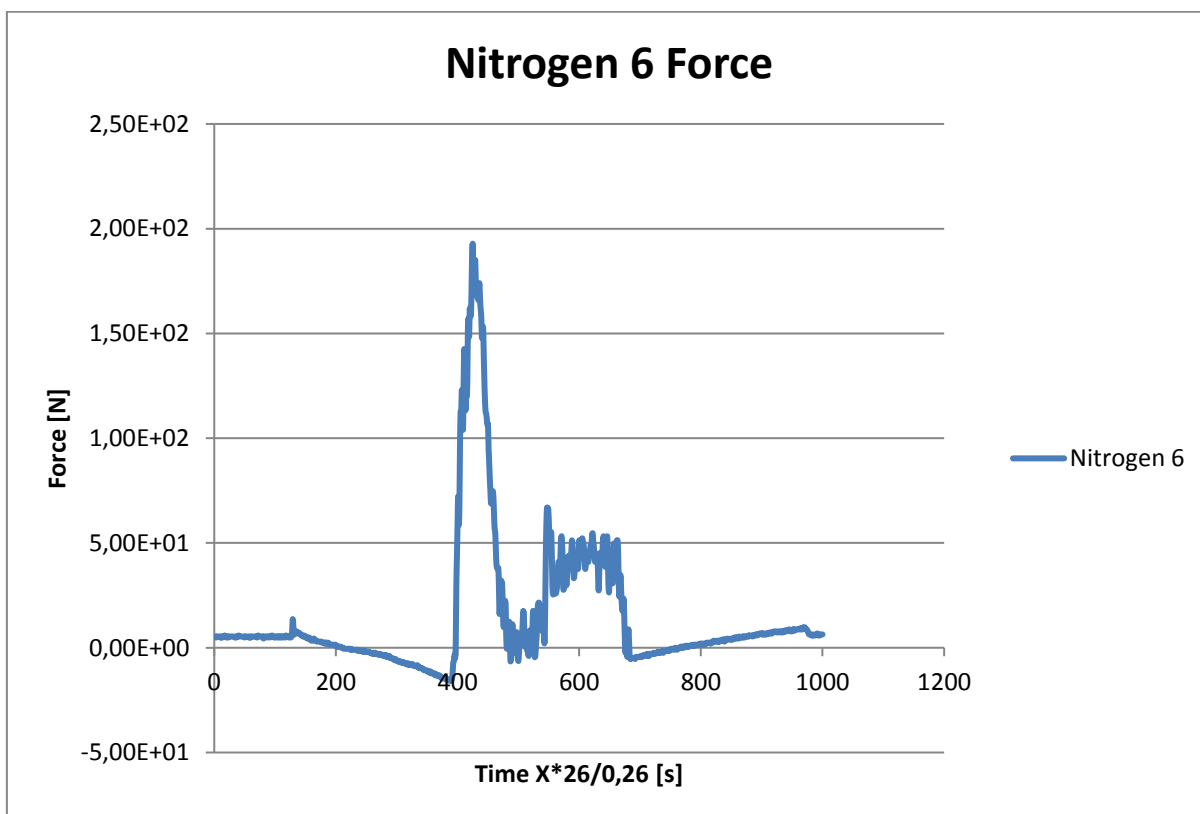
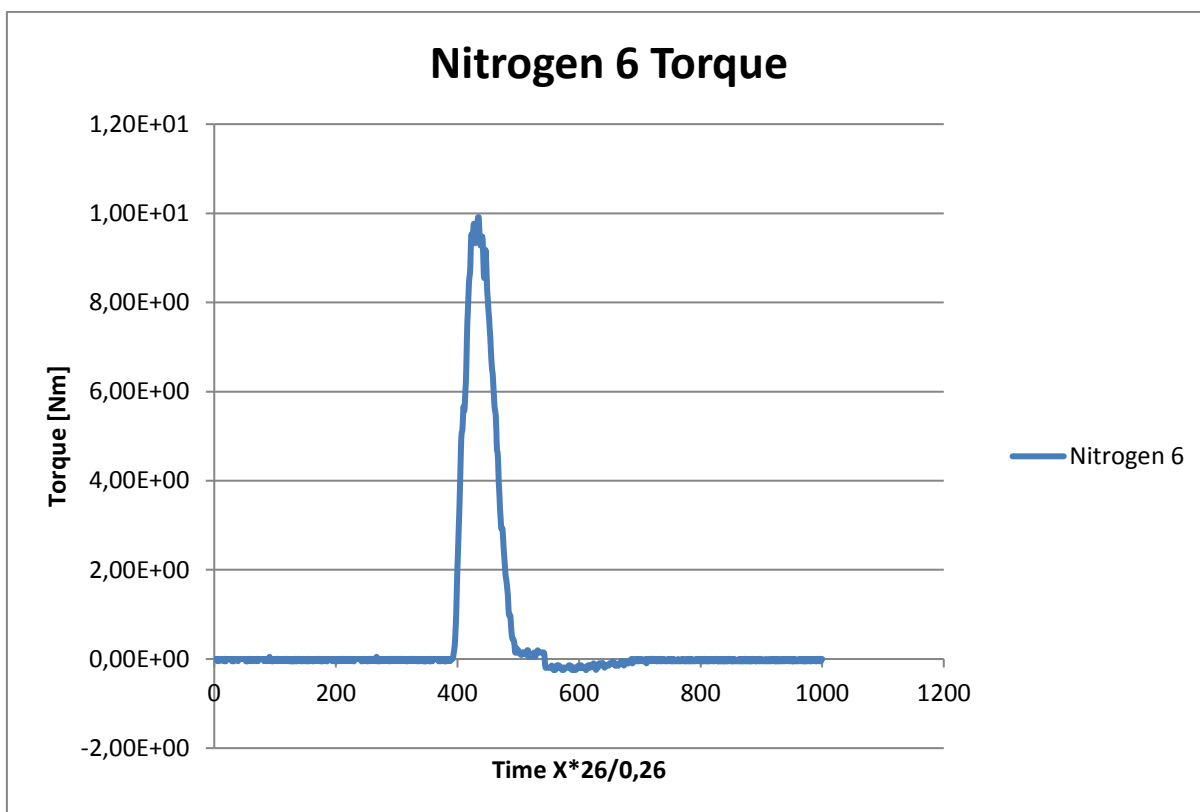
Příloha 19 – Oxygen Graf síly a kroutícího momentu



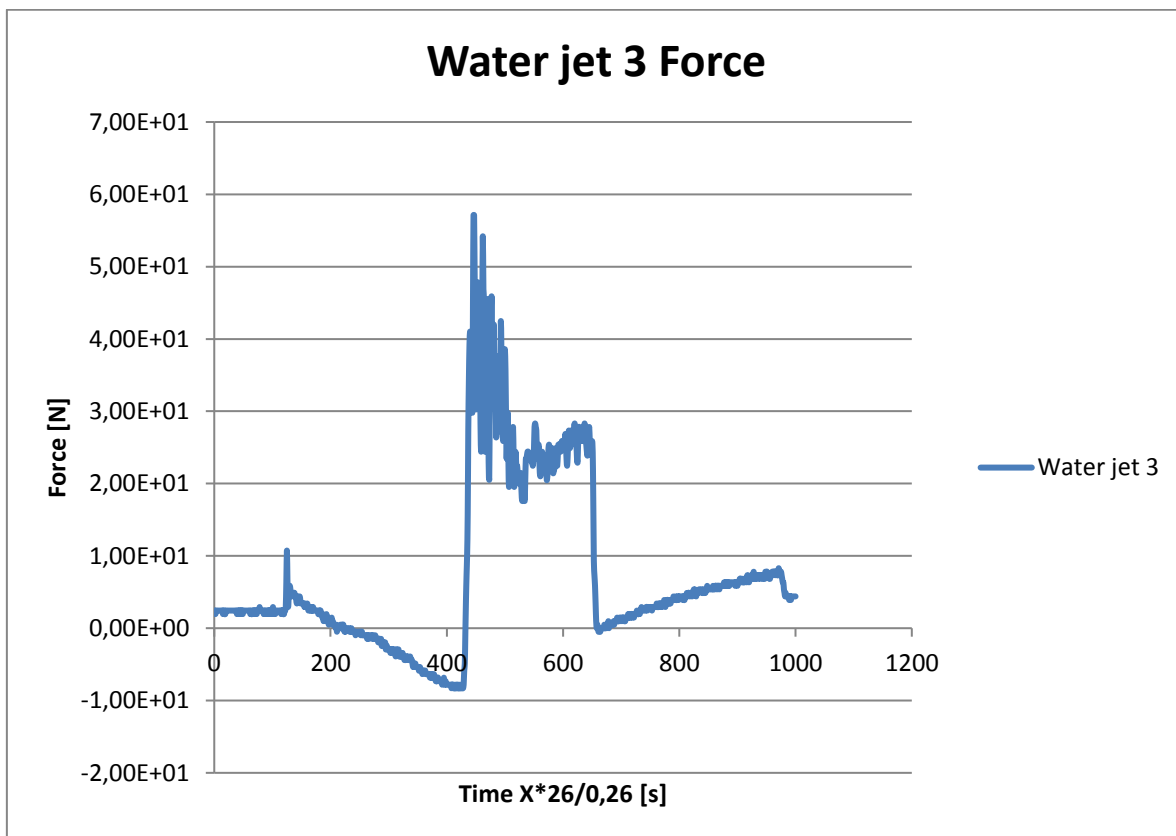
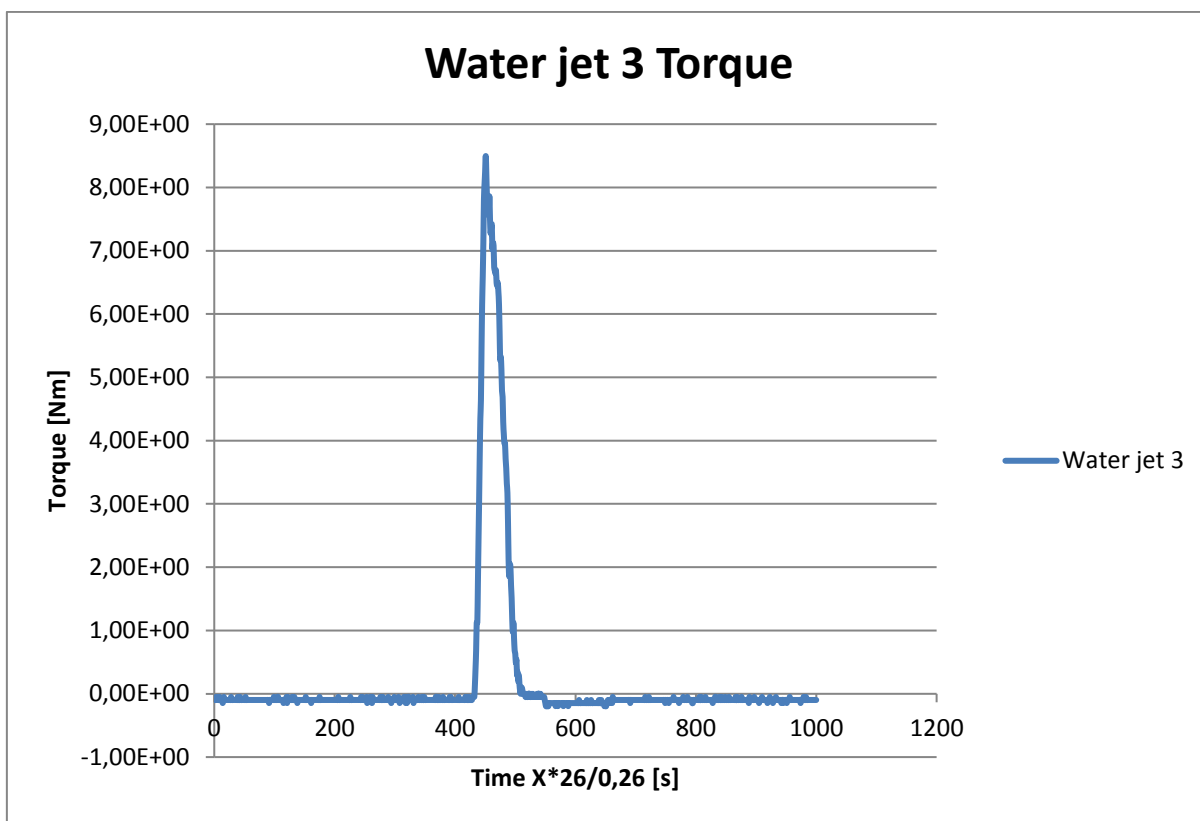
Příloha 20 – Nitrogen_3 Graf síly a kroutícího momentu



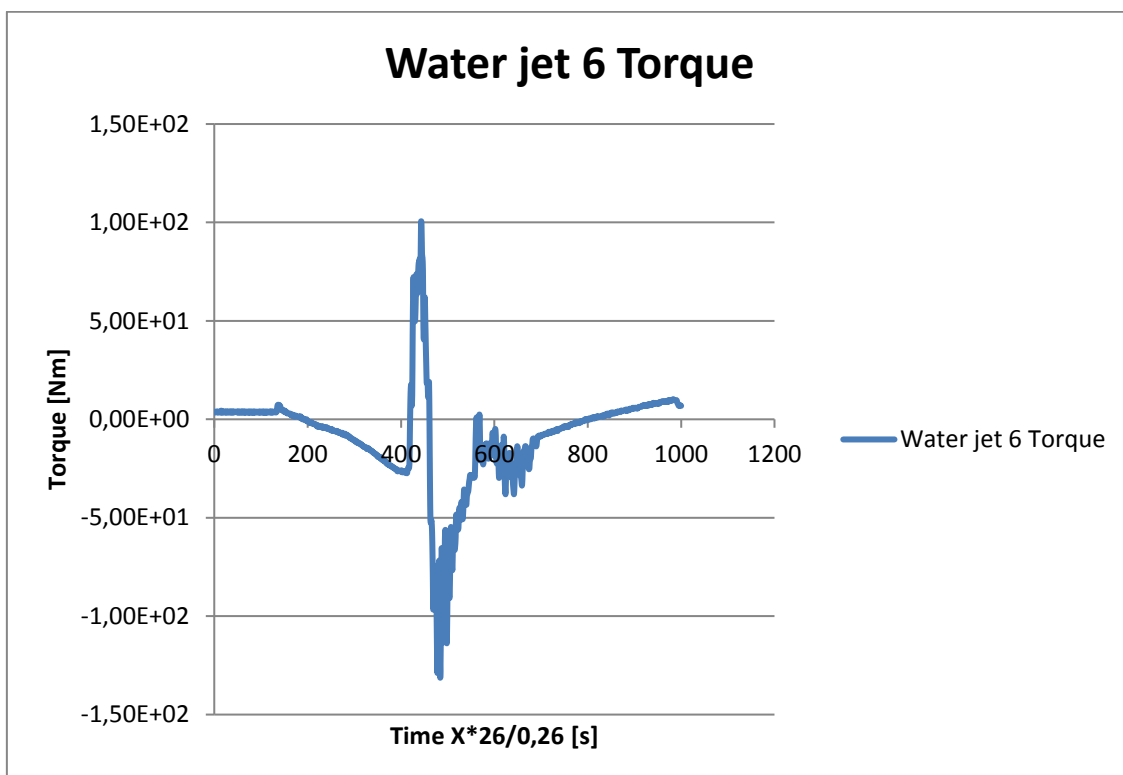
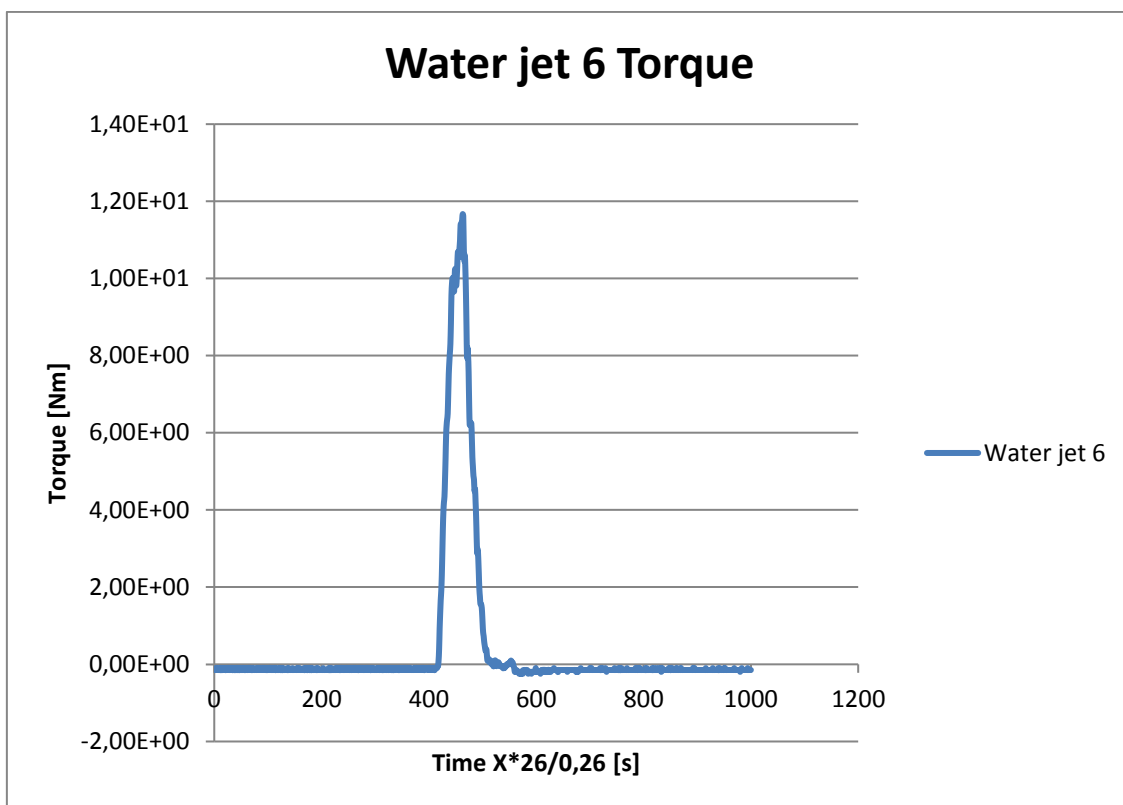
Příloha 21 – Nitrogen_6 Graf síly a kroutícího momentu



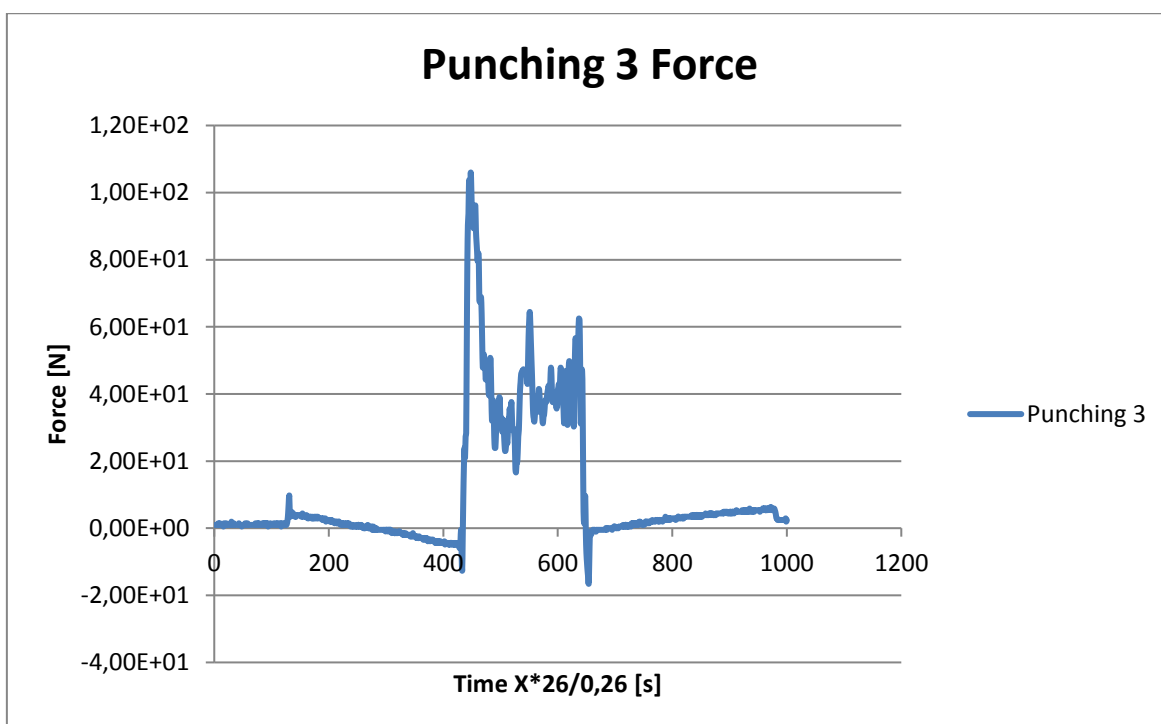
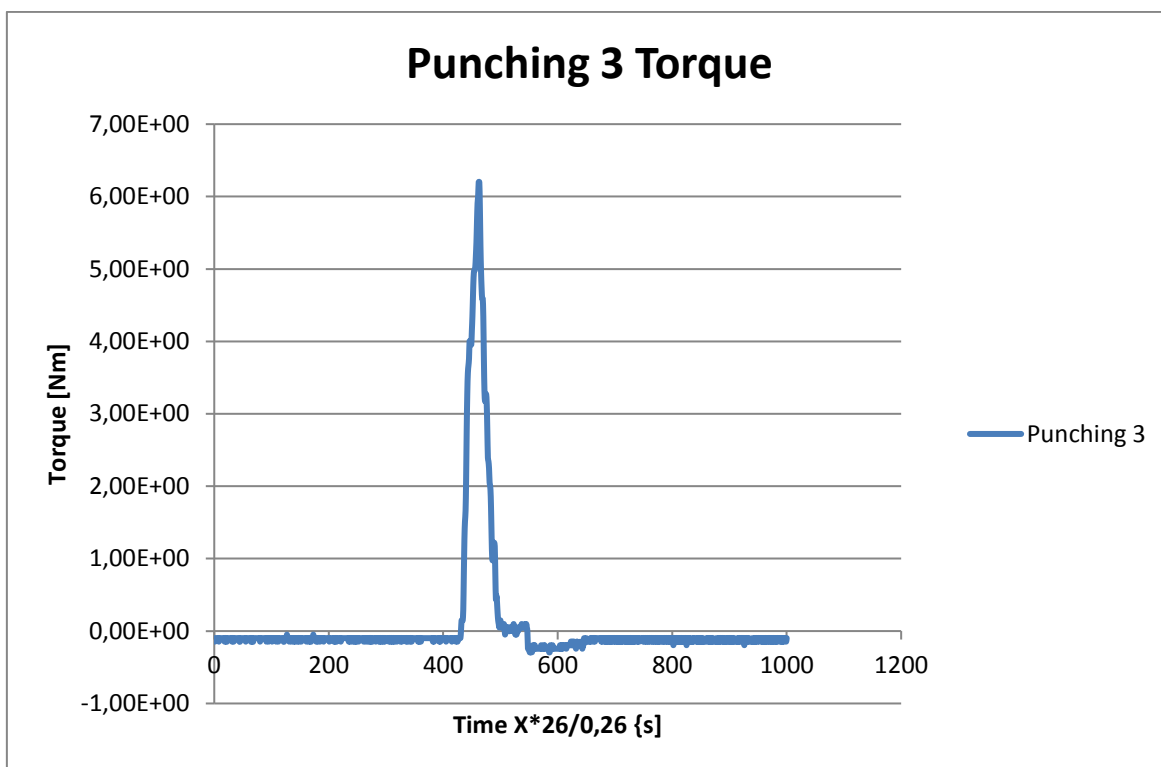
Příloha 22 – Waterjet_3 Graf síly a kroutícího momentu



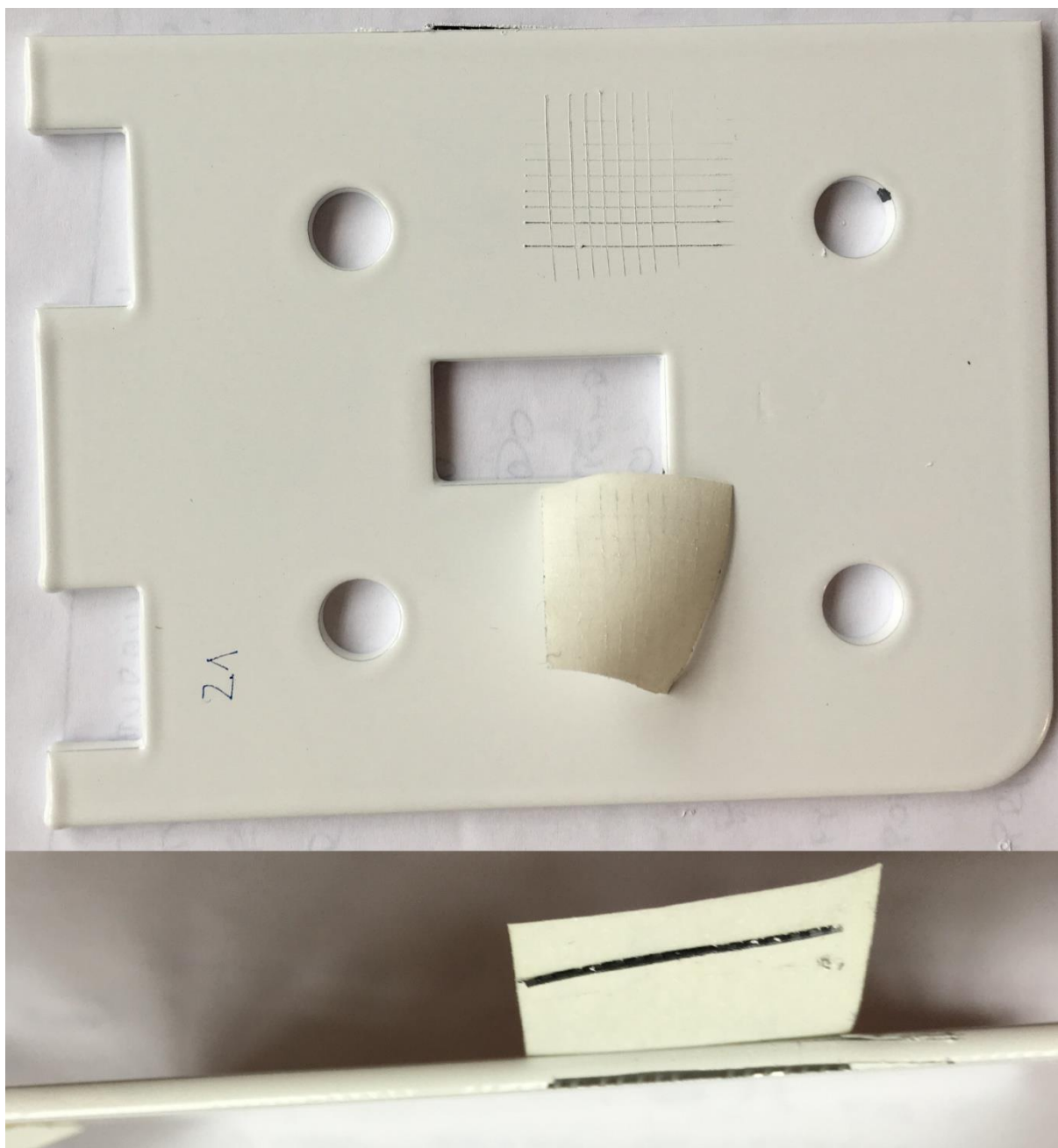
Příloha 23 – Waterjet_6 Graf síly a kroutícího momentu



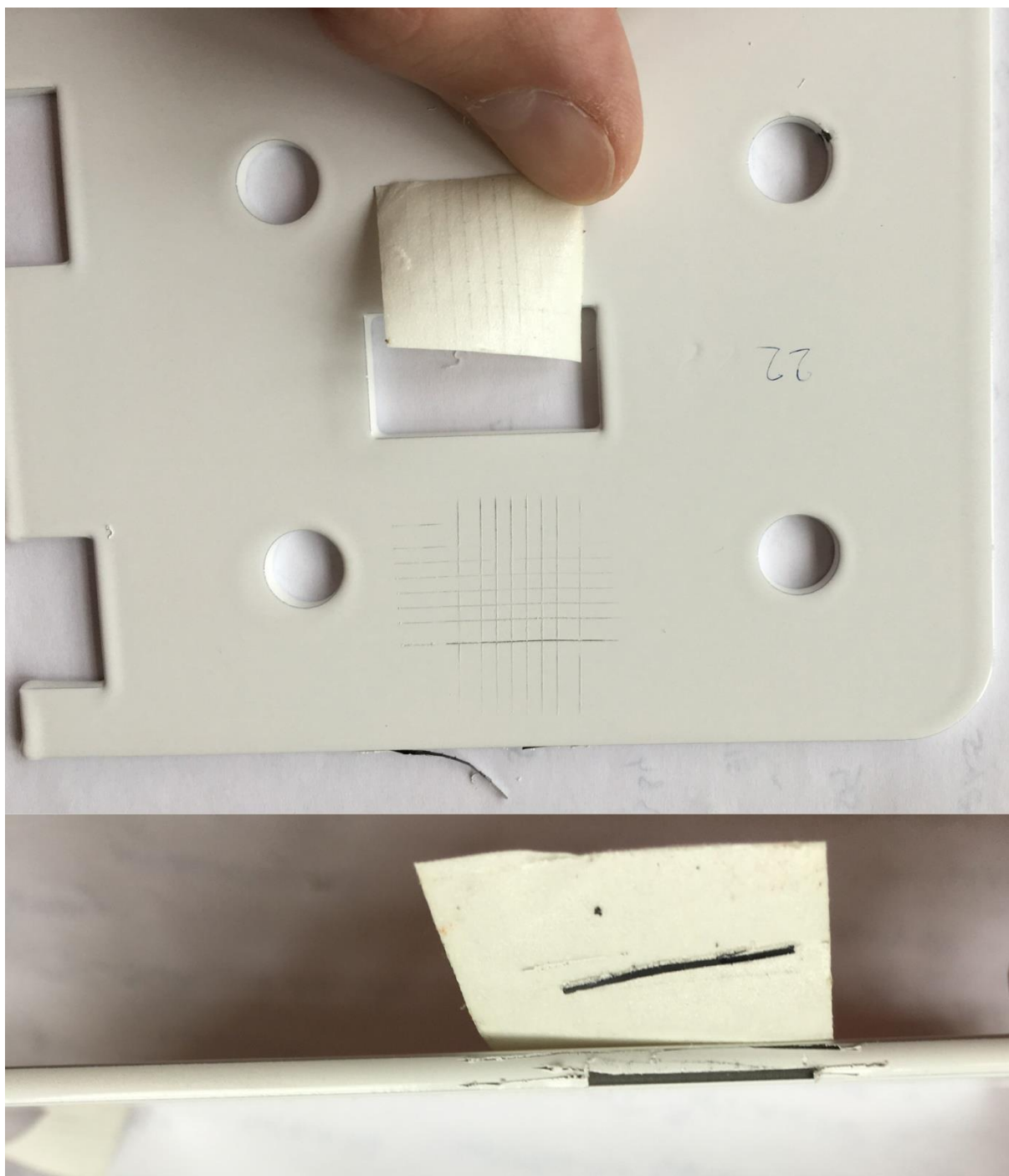
Příloha 24 – Punch_3 Graf síly a kroutícího momentu



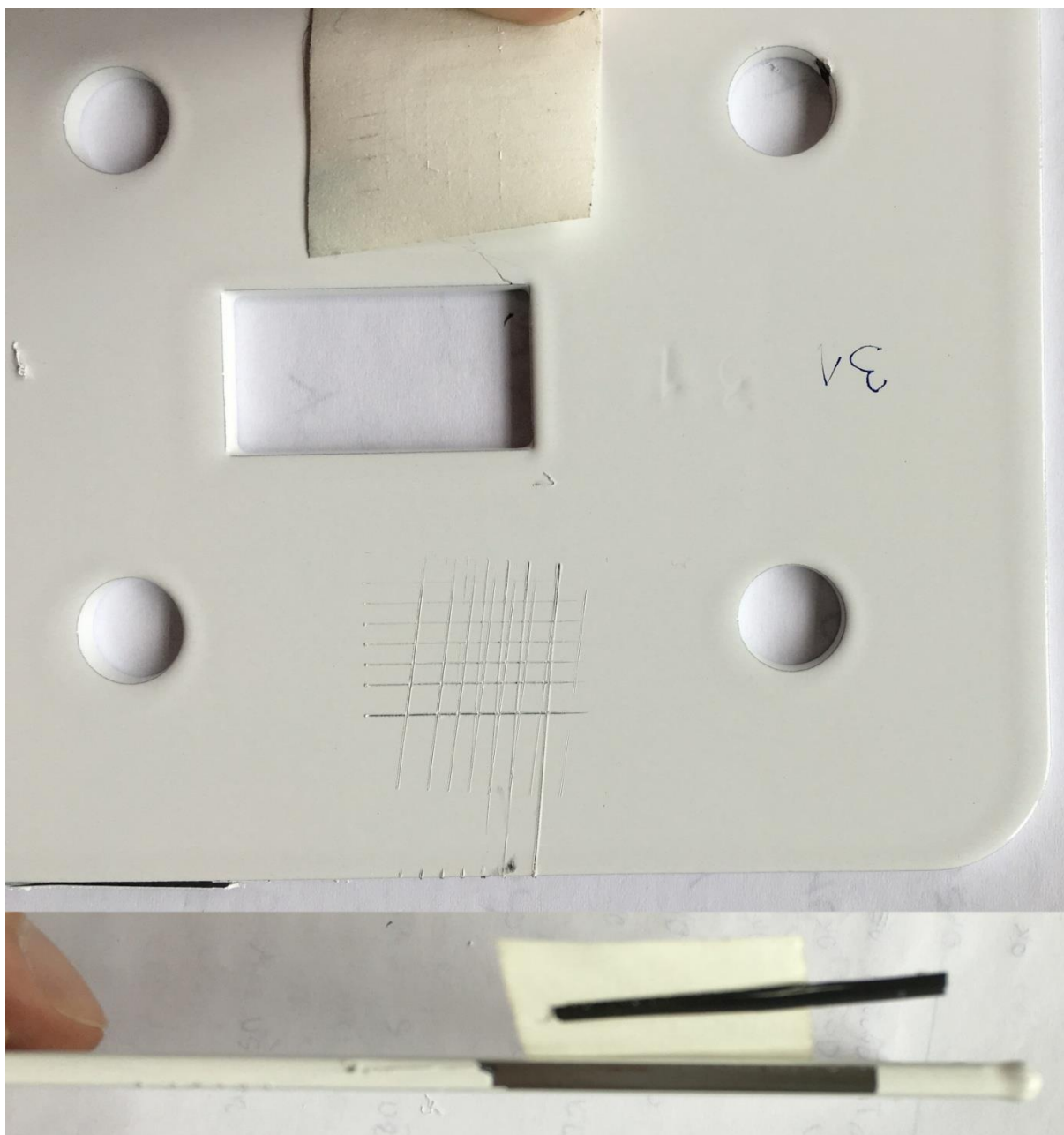
Příloha 25 – Test povrchové úpravy vzorku 33S235JR



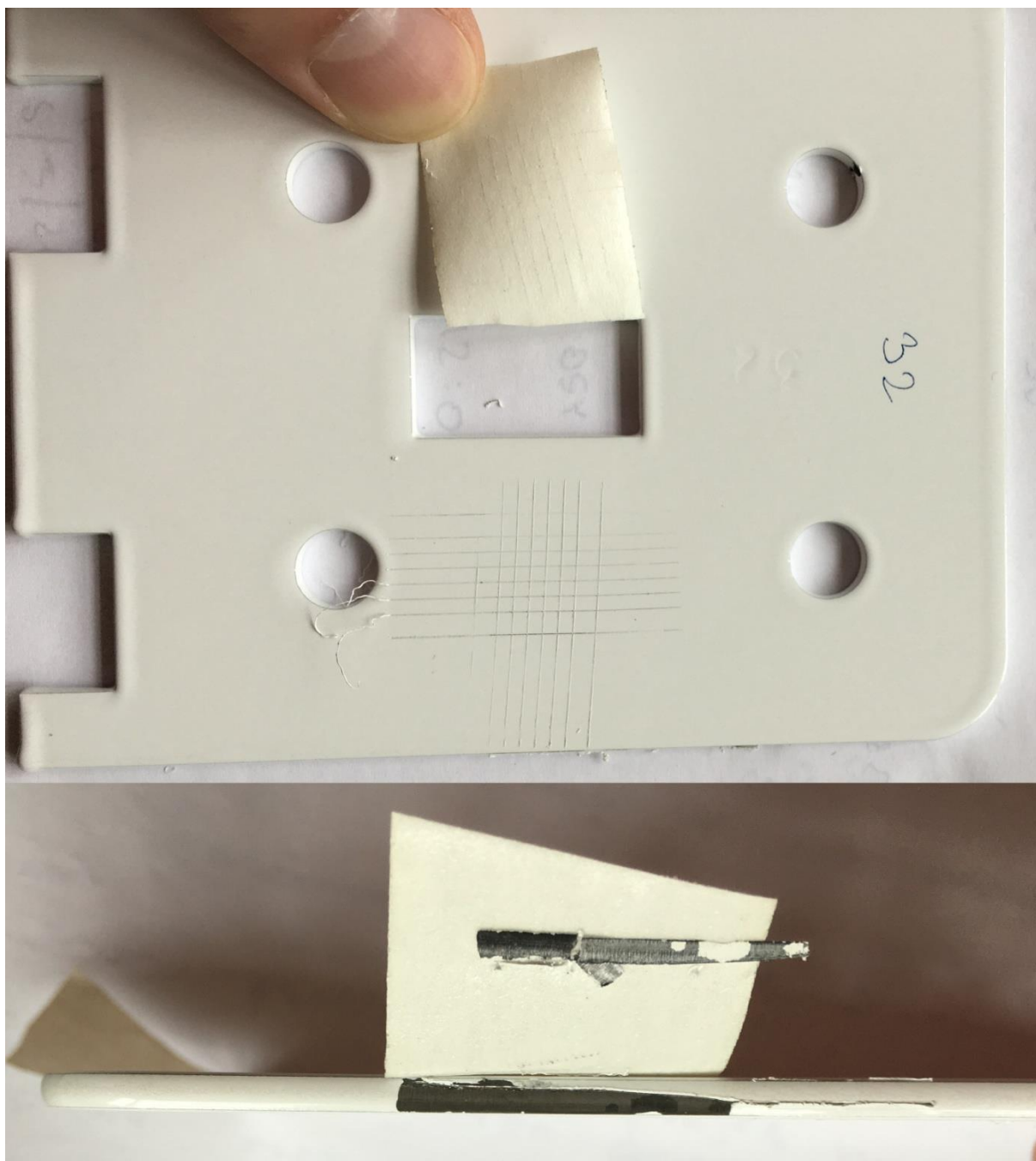
Příloha 26 – Test povrchové úpravy vzorku 34S235JR



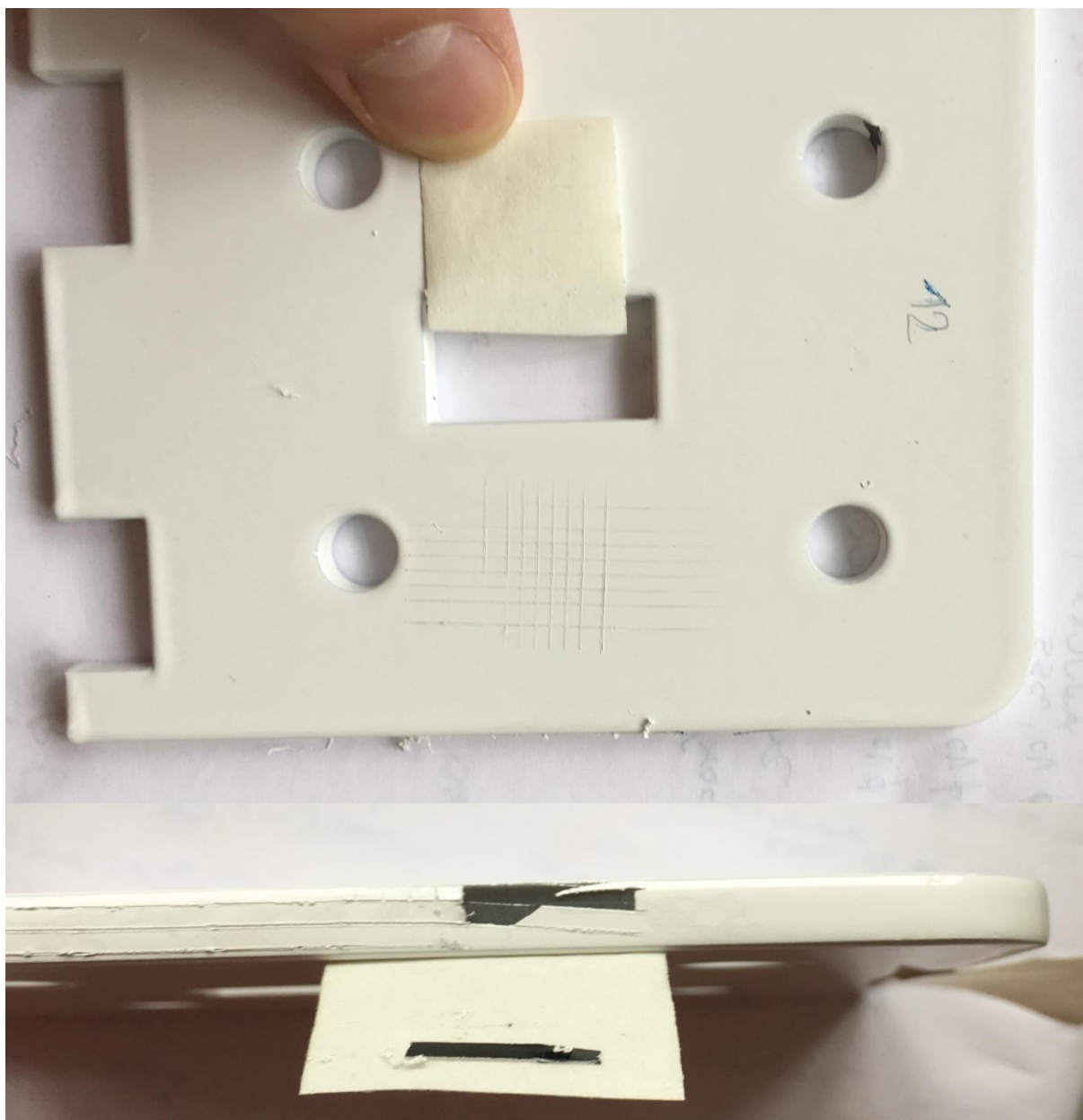
Příloha 27 – Test povrchové úpravy vzorku 31DC01



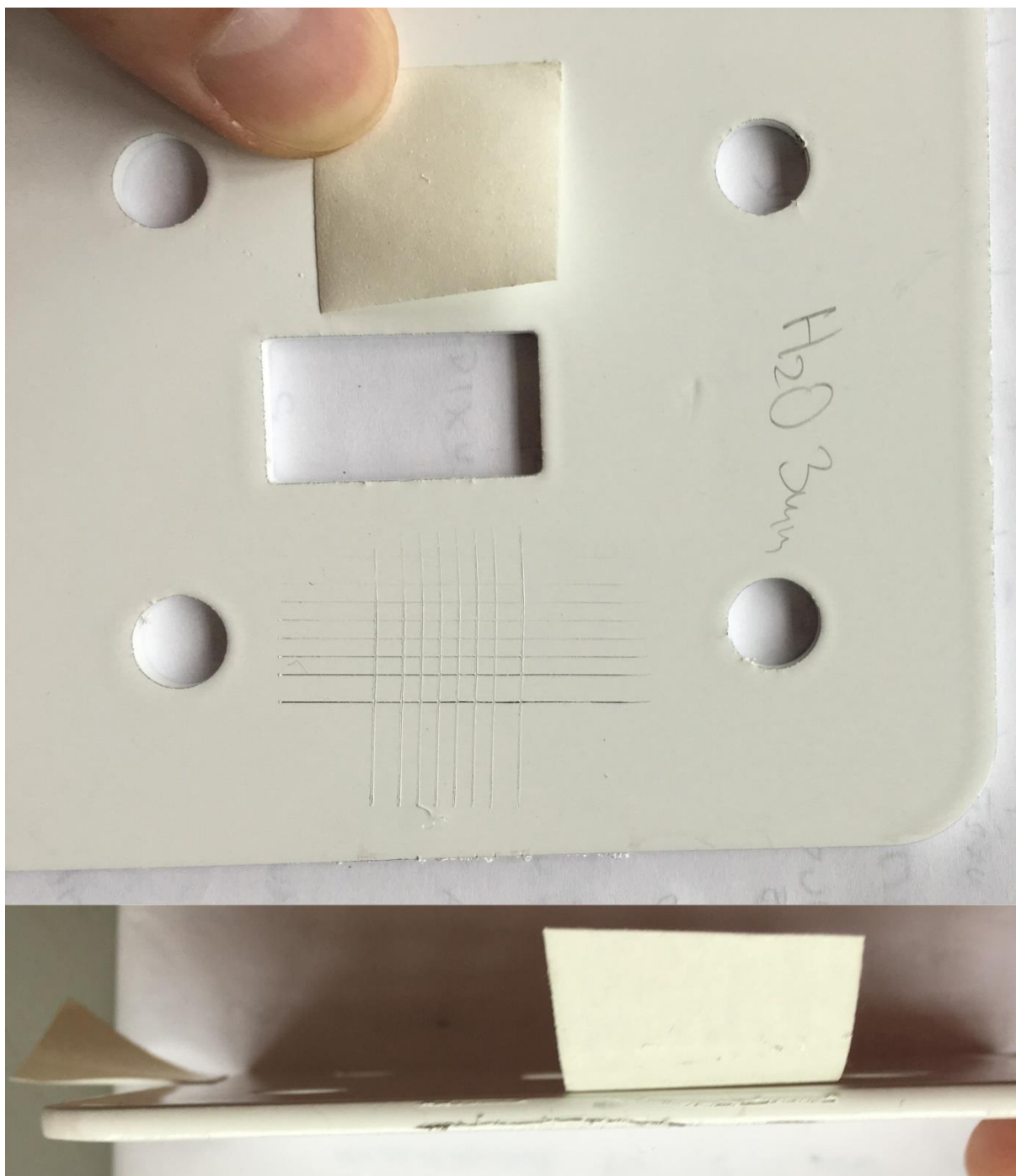
Příloha 28 – Test povrchové úpravy vzorku 32DC01



Příloha 29 – Test povrchové úpravy vzorku 62



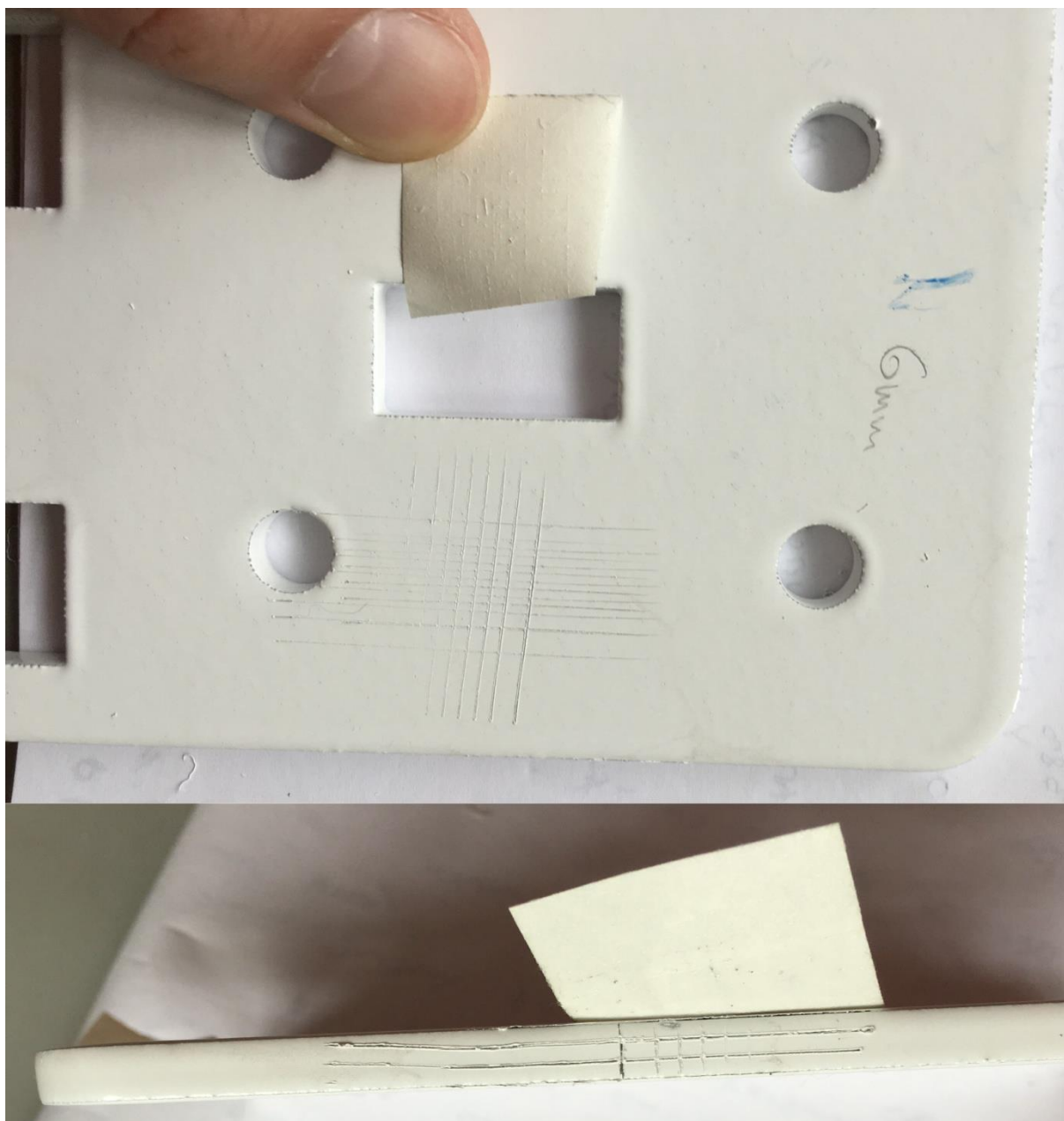
Příloha 30 – Test povrchové úpravy vzorku Waterjet_3



Příloha 31 – Test povrchové úpravy vzorku Waterjet_6



Příloha 32 – Test povrchové úpravy vzorku Nitrogen_6



Příloha 33 – Test povrchové úpravy vzorku Nitrogen_3



Příloha 34 – Test povrchové úpravy vzorku Oxygen



Příloha 35 – Test povrchové úpravy vzorku Punch

